



周圆, 沈云鹏, 段志平, 李月帅, 张卫峰. 肥料物理性质对无人机撒肥均匀性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 57-71.
ZHOU Yuan, SHEN Yunpeng, DUAN Zhiping, LI Yueshuai, ZHANG Weifeng. Effects of physical properties of fertilizer on the uniformity of UAV fertilization [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 57-71.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.06

肥料物理性质对无人机撒肥均匀性的影响

周圆¹ 沈云鹏² 段志平¹ 李月帅¹ 张卫峰^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 吉林农业大学 资源与环境学院, 长春 130118)

摘要 为探究不同肥料物理性状与无人机播撒均匀度之间的关系, 测定3种复合肥与3种颗粒尿素的颗粒物理学特性参数, 并且在不同飞行速度、不同飞行高度和不同离心盘转速下, 探寻影响无人机施肥均匀性的肥料物性指标, 同时初步建立各种肥料最优的作业参数。结果表明: 1) 肥料撒施均匀度与肥料的比重、休止角及堆密度的相关性最为显著, 其他指标通过影响肥料的比重、休止角及堆密度进而影响施肥均匀度。2) 不同肥料适配的最优参数不同, 在本研究飞行环境下, 4 m飞行高度、5 m/s飞行速度, 15-15-15在1 100 r/min转速下播撒均匀度最高; 3) 本研究初步得出2种肥料相较而言, 复合肥播撒的均匀度更佳, 撒肥量更大。不同飞行参数下15-15-15的均匀度普遍高于其他肥料, 变异系数较小。肥料的高强度与较大的球形度显著提升了水稻施肥效率, 促进了无人机对肥料的播撒, 降低了肥料损失。适配无人机的肥料确实能够提高肥料的播撒均匀度。

关键词 无人机施肥; 颗粒肥料; 理化性质; 飞行参数; 播撒均匀度

中图分类号 S145.5

文章编号 1007-4333(2024)12-0057-15

文献标志码 A

Effects of physical properties of fertilizer on the uniformity of UAV fertilization

ZHOU Yuan¹, SHEN Yunpeng², DUAN Zhiping¹, LI Yueshuai¹, ZHANG Weifeng^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract In order to explore the relationship between the physical properties of different fertilizers and the uniformity of UAV seeding, the physical and mechanical characteristics of three kinds of compound fertilizers and three kinds of granular urea were determined, and the physical properties of fertilizers affecting the uniformity of UAV fertilization were explored under different flight speeds, different flight altitudes and different centrifugal disk speeds, and the optimal operating parameters of various fertilizers were preliminarily established. The results showed that: 1) The correlation between the uniformity of fertilizer spreading and the specific gravity, angle of repose and bulk density of fertilizer was the most significant, and other indexes affected the uniformity of fertilization by affecting the specific gravity, angle of repose and bulk density of fertilizer. 2) The optimal parameters of different fertilizer adaptation are different, and the spreading uniformity is the highest at 4 m flight altitude and 5 m/s flight speed, and 15-15-15 at 1 100 r/min speed. 3) Compared with other fertilizers, 15-15-15 has better uniformity and a larger amount of fertilizer. The uniformity of 15-15-15 was generally higher than that of other fertilizers under different flight

收稿日期: 2024-06-10

基金项目: 支撑华北绿色超吨粮的高效功能肥料创制与应用项目(PC2023A02001); 巢湖面源污染关键技术研究项目(二期)(1031-69194009)

第一作者: 周圆 (ORCID: 0009-0003-0006-2762), 硕士研究生, E-mail: 869819414@qq.com

通讯作者: 张卫峰 (ORCID: 0000-0002-6675-2075), 教授, 主要从事养分资源宏观管理研究, E-mail: wfzhang@cau.edu.cn

parameters, and the coefficient of variation was smaller. Its high strength and large sphericity significantly improve the fertilization efficiency of rice, promote the sowing of fertilizer by drones, and reduce fertilizer loss. Fertilizers adapted to drones can indeed improve the evenness of fertilizer spreading.

Keywords UAV fertilization; granular fertilizer; physical and chemical properties; flight parameters; dispersal uniformity

在绿色发展的紧迫需求下,通过施肥方式变革大幅度提高肥料利用率是当前重要命题^[1-2]。随着精准农业技术发展,机械施肥也不断有新的突破^[3]。水稻机械化作业可以提升水稻种植的效率,实现水稻种植的现代化和智能化^{[[4-5]}。随着无人机施肥技术的迅速发展,无人机撒播肥料逐渐兴起,大疆、极飞、珠海羽人和深圳高科新农等企业已开发出撒播多旋翼无人机^[6-7]。但无人机施肥技术仍存在作业播量范围有限和调节精度不高等问题^[8]。前人主要通过改造无人机排肥装置提高无人机作业效率,但优选肥料和调节肥料以提高无人机施肥精度的研究较少,无人机施肥技术对肥料利用率没有显著提升,技术还有待完善^[9]。

我国的国家肥料标准都是建立在人工撒施作业的基础上,对肥料的物理性状通常只对粒径大小及含水率有规定,对肥料的颗粒强度、球形率、吸湿率、光滑度和休止角等颗粒物理性状并无要求^[10]。王磊等^[11]建立肥料颗粒的运行模型,发现肥料颗粒的物理特性和排肥器材特性均对排肥性能有影响。但目前肥料物性中哪些指标影响无人机排肥尚没有形成清晰的认识^[12],无法支撑无人机专用肥的研制和选用。企业存在盲目生产,农户存在盲目选择的问题。在施用固态颗粒肥时,为达到良好的排肥效果(播幅、播量),需要针对不同肥料的物理特性设计作业速度等参数,但目前这一类研究也较少,导致田间作业处于盲目状态,进而影响肥料的施肥效果^[13]。无人机撒肥中经常会出现堵塞的情况,不仅影响作业效率也影响施肥精准度,这也与肥料物理性状直接相关^[14-15]。

上述问题在长江中下游稻区尤为明显,在2023—2024年对上海庙镇和绿华镇的农户调研中发现,当地常用的无人机追肥产品有尿素和复合肥等,种类繁多,而且无人机作业规范缺失^[16]。在施肥过程中,随着飞行高度的变化,肥料在土壤中扩散区域也发生变化,对肥料分布产生影响。刘鑫^[17]建议在3 m/s的飞行速度和1.5 m飞行高度施肥,而肖汉祥等^[18]认为飞行高度在2~2.5 m,飞行速度

约3~5 m/s最佳。但这些研究均未明确对于不同肥料该如何匹配无人机作业参数^[19-20]。

本研究拟通过分析上海崇明现有无人机和现有肥料产品,研究不同肥料的物理性状及与无人机播撒均匀度的关系,明确影响无人机施肥效果的肥料关键物性参数,以及满足施肥均匀度的作业参数和肥料匹配方案,以期高效便捷的无人机撒肥运行系统提供科学依据,为同步提高水稻机械化撒肥效率和水稻高产提供关键指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2024年2—5月在合肥市肥东县中盐安徽红四方肥料绿色实验室进行。所选无人机型号为3WWDZ-40A大疆农业无人飞机,供试肥料为粒径差别大的大、中、小颗粒尿素与养分含量不同的3种复合肥,分别是15-15-15、17-17-17和24-8-10(在上海崇明农田无人机撒肥最为常见的肥料品种)。其中15-15-15复合肥、17-17-17复合肥、大颗粒尿素、中颗粒尿素、小颗粒尿素来自安徽红四方有限公司,24-8-10复合肥来自上海惠尔利农资有限公司。

1.2 肥料物性测试

为反应肥料颗粒性状与无人机匹配性,本研究结合沉积分布模型标准,最终确定的肥料物理性质包括肥料颗粒的粒径、含水率、吸湿度、休止角、球形度、强度、颗粒比重和颗粒堆密度。肥料颗粒的物理力学特性不仅与成分含量有关,而且还受加工工艺、原料和填料的影响^[21-26]。

1.2.1 颗粒粒径测定

粒径是指颗粒的大小,又称“粒度”或者“直径”。一般国标要求粒径达到0.1~5.0 μm,但是粒径的分布却是施肥均匀性的关键。在6种肥料中随机选1 000 g样品,依次通过5、4、3、2和1 mm孔径的标准网筛对肥料进行粒径分级,然后用电子秤称取不同粒径范围对应的质量,从而获得肥料粒径分布及对应的质量分数。

1.2.2 颗粒含水率测定

颗粒含水率是指一定的温度和湿度条件下,肥料中所含水分的重量比例。本试验采用烘箱干燥法,取样品充分混匀后堆成圆锥形。所需样品 100 g,再将样品放入 80~90 °C 恒温燥箱中烘 15~30 min,降温至 65 °C,保持 12~24 h,取出称量。水分含量以质量百分数(%)表示,试验所用仪器设备有电热恒温真空干燥箱(温度 150.2 °C,真空度 64.0~70.7 kPa)、样品盒、电子天平(精确到 0.001 g)、称量瓶(直径 50 mm、高 30 mm)。计算公式如下:

$$\text{颗粒含水率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为干燥前样品及铝盒质量, g; m_2 为烘干后样品及铝盒质量, g; m_0 为铝盒质量, g。

1.2.3 颗粒吸湿度测定

吸湿度是指肥料在空气中能吸收水分的性质。目前尚没有肥料相关标准。将一定重量(2 g)的肥料放置培养皿中,置于恒温恒湿箱中,每隔 1 h 测试重量以检验肥料吸水情况。

$$\text{肥料吸湿率} = (W_1 - W_0) / W_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_1 为样品吸湿后质量, g; W_0 为样品吸湿前质量, g。

1.2.4 颗粒休止角测定

休止角是指在重力场中,粒子在粉体堆积层的自由斜面上滑动时所受重力和粒子之间摩擦力达到平衡而处于静止状态下测得的最大角,休止角越小表明流动性越好。一般机械施肥要求休止角 < 30°。底盘为直径 7 cm 培养皿,将 2 只玻璃漏斗上下交错重叠,固定在铁架台上,下漏斗出口与底盘距离为 3.5~6.0 cm;取肥料若干,从上部漏斗慢慢加入,辅料经过 2 只漏斗的缓冲逐渐堆积在底盘上,形成锥体,直至得到最高的锥体为止。测定每种样品各测定 3 次,取平均值。

$$a = \tan^{-1} H/R \quad (3)$$

式中: a 为休止角, °; H 为锥体的高, cm; R 为底盘半径, cm。

1.2.5 颗粒球形度测定

球形度是指颗粒形貌的参数。肥料颗粒的几何尺寸,通常以长、宽、高三轴尺寸来表示,它对无人机的撒肥过程有较大影响。随机抽取 100 粒肥料,采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺,测量各品种肥料的长、宽、厚。

$$D_p = (LWT)^{1/3}, \varphi = D_p/L \quad (4)$$

式中: D_p 表示肥料颗粒球形度, %; L 表示肥料的长, mm; W 表示肥料的宽, mm; T 表示肥料的长厚, mm; φ 表示肥料的球形率, %。

1.2.6 颗粒强度测定

颗粒强度系数的大小反映受外力作用的弹性体抵抗变形的能力。本研究通过 GWJ-2 数显谷物硬度计(北京金科利达电子科技有限公司,中国)对肥料颗粒进行挤压试验来测量肥料的强度系数。

1.2.7 颗粒比重测定

颗粒比重指固体颗粒的密度与水的密度之比,也称为干实际密度。称取肥料样品 50~100 g,将称好的肥料样品放在 500 mL 三角瓶中,加入选定的分散剂 20 mL 后,再用蒸馏水冲至 200~300 mL。摇匀静置 2 h,每隔 15 min 左右摇动一次。盖上小漏斗,放在电热板上加热煮沸。煮沸后保持沸腾 10 min。将冷却的三角瓶中悬液全部进入沉降筒,用蒸馏水定容到 1 000 mL。用搅拌棒搅动悬液 1 min,测定液温,记录比重计读数。

1.2.8 颗粒堆密度测定方法

颗粒堆密度质量除以该粉体所占容器的体积求得的密度。将肥料样品装入容器中所测得的体积包括粉体真体积、粒子内空隙和粒子间空隙等,因此容器的形状、大小、物料的装填速度及装填方式等影响粉体体积。将粉体装填于测量容器时不施加任何外力测得密度^[27]。

$$\rho = M/V \quad (5)$$

式中: ρ 表示颗粒堆密度, %; M 表示颗粒质量, g; V 表示颗粒体积, mL。

1.3 肥料撒播均匀性试验设计

1.3.1 试验地点

试验地位于上海市崇明区庙镇万北村,年平均气温 16.5 °C。该地区属于亚热带季风气候,平均降雨量约为 1 128.9 mm,日照充足,气候温和,地势较平坦。年平均气温在 16~17 °C,无霜期 236 d,雨量丰沛,年平均降雨量 1 129~1 149 mm,降雨呈现明显的季节性。将试验的 6 种肥料装于 3WWDZ-40A 大疆农业无人飞机撒肥装置上,进行撒肥验证试验。

1.3.2 试验方法

无人机施肥关键作业参数为无人机飞行高度、飞行速度和离心盘转速,为研究肥粒散布特性的影响因素,制定不同肥料颗粒的无人机飞行参数。在不同

飞行参数组合下进行3次重复。设立平整10 m×20 m收集域,沿无人机飞行中线方向布置5组铝制支架,每组支架间隔5 m,每组支架布置10个取样点,每个取样点间隔1 m,每个采样点上固定一个肥料收集盒,收集盒大小为30 cm×30 cm×15 cm(图1)。在田间试验过程中通过布置采集盒的方式对颗粒沉积效果进行采集和检测^[28-34]。将采集盒内颗粒统一封装称重,便于后续处理。试验结束后,去掉试验10个取样点的边缘数据,选取中间5个取样点进行称重,计算肥料的播撒均匀度。肥料播撒均匀度指数是衡量肥料在播撒过程中分布均匀程度的一个指标,展示肥料颗粒在目标区域内的分布情况,即肥料颗粒是否均匀、无遗漏播撒。参考常红英^[35]等利用网格计数法来评价金相面上颗粒分布的均匀程度,沉积区内采样点间肥料颗粒均匀度为:

$$U = 100\% \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N |p_i - \bar{p}|}{N^p} \right] \quad (6)$$

式中: U 表示颗粒均匀度; P_i 表示每一排收集的肥料颗粒质量,g; $\bar{p}$ 表示平均每排收集的肥料质量,g; N^p 表示每排样品收集点数量,个。

1.4 统计检验

采用Excel 2010和SPSS 26.0进行数据处理、统计分析,对数据进行单因素方差(One-way ANOVA)分析,数值为平均值+标准差,处理间均值比较使用Duncan差异显著性检验($P < 0.05$);用Origin 2024作图。Statistics 23.0进行统计分析和相关性分析。多个因素采用多因素logistic回归模型法,差异显著水平为0.05($P < 0.05$ 为差异显著)。采用Origin 2024软件绘制图形。

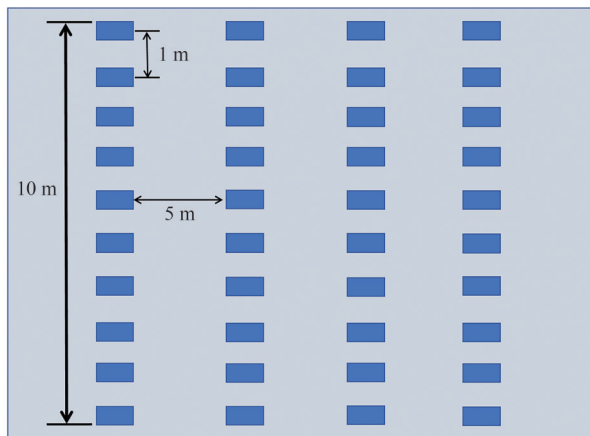


图1 试验场地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test site

2 结果与分析

2.1 肥料颗粒的物理性状

2.1.1 粒径分布

小颗粒尿素有85.87%的粒径集中在1~2 mm,中颗粒尿素有63.27%集中在2~3 mm,而大颗粒尿素则有60.13%集中在3~4 mm;复合肥产品中,15-15-15、17-17-17和24-8-10有38.63%~55.93%集中在2~3 mm,其中24-8-10的2~3 mm颗粒肥料占比最多(表1)。这6种肥料的粒径分布居于2~4 mm的颗粒占比达到74.00%~97.00%。

2.1.2 颗粒强度、比重

肥料强度小,易碎易变形,机械施用可能粉化,造成堵塞^[25]。同类型产品,一般随着粒径变大,强度也变大。例如小颗粒尿素、中颗粒尿素和大颗粒尿素的强度从5.90 N到26.70 N到31.44 N。

而3种复合肥采用不同的工艺,存在原料不同、

表1 6种颗粒肥料粒径分布

Table 1 Particle sizes of nine types of granular fertilizers

%

品种 Variety	粒径分布 Particle size distribution				
	1~2 mm	2~3 mm	3~4 mm	4~4.75 mm	>4.75 mm
大颗粒尿素 Large granule urea	2.37	35.67	60.13	2.23	0
小颗粒尿素 Small granule urea	85.87	14.07	0.04	0	0
中颗粒尿素 Medium granule urea	34.23	63.27	3.67	0	0
15-15-15	0.93	55.93	24.37	17.30	0.90
17-17-17	0.67	51.63	31.60	15.73	0.17
24-8-10	2.23	38.63	26.27	28.93	2.73

填料不同等问题,强度也不同。红四方的2种复合肥采用尿浆氨酸法生产,且无填充剂合成,其生产方法与上海惠尔利农资有限公司的有所差距,其强度普遍高于上海惠尔利的复合肥。而红四方2种复合肥之间也存在差异,17-17-17强度略低于15-15-15。

肥料比重也与强度有相关性,随着强度增加比重也增加,如小颗粒、中颗粒、大颗粒尿素的比重分别为1.15%、1.27%和1.28%(表2)。小颗粒尿素的比重最小,强度低,越容易被碾压粉碎,可能会在无人机施肥中存在堵塞问题;而不同工艺的复合肥也表现相同规律,15-15-15和17-17-17的强度普遍高于24-8-10,比重也相对较高。不易受到外界压力的影响而发生变化,粉碎程度较低^[36-38]。

2.1.3 肥料颗粒吸湿性、含水率

从图2(a)可以看出,6种肥料的吸湿性变异范围从1.33%~12.30%,肥料的吸湿性存在显著差异。中颗粒尿素的吸湿率最低,仅为1.33%,显著低于其他5种肥料($P<0.05$),表明其储存效果更好,不易受潮变形,利于长期存放;而15-15-15的吸湿率最高,达到12.30%,显著高于其他5种肥料,说明长期存放于无人机容易导致结块,或者不宜与其他肥料混合放置,否则导致结块;其他4种产品均略低于15-15-15,而大幅度高于中颗粒尿素。

从图2(b)中可以看出,6种肥料的含水率变异范围从0.04%~3.44%,其中3种尿素的含水率普遍低于3种复合肥。而3种尿素之间也有

肥料种类 Fertilizer type	强度/N Strength	比重/% Pecific gravity
15-15-15	60.04	1.61
17-17-17	54.32	1.64
24-8-10	34.31	1.39
小颗粒尿素 Small granule urea	5.90	1.15
中颗粒尿素 Medium granule urea	26.70	1.27
大颗粒尿素 Large granule urea	31.44	1.28

显著差异,小颗粒尿素含水率最低,达到0.04%,接近于0;大颗粒尿素的含水率0.15%,中颗粒尿素达到0.53%;15-15-15含水率最高,达到3.44%。

结合含水量与吸湿度来看,两者并不直接相关,3种尿素产品中含水率高的产品吸湿性并不一定高,反之亦然。例如中颗粒尿素含水量高于大颗粒尿素和小颗粒尿素,但其吸湿性却最低,说明吸湿性受环境影响较大,而不是其本身的含水量;其产品中含有高吸湿性物质可能是主要因素。但复合肥的吸湿度与含水量趋势一

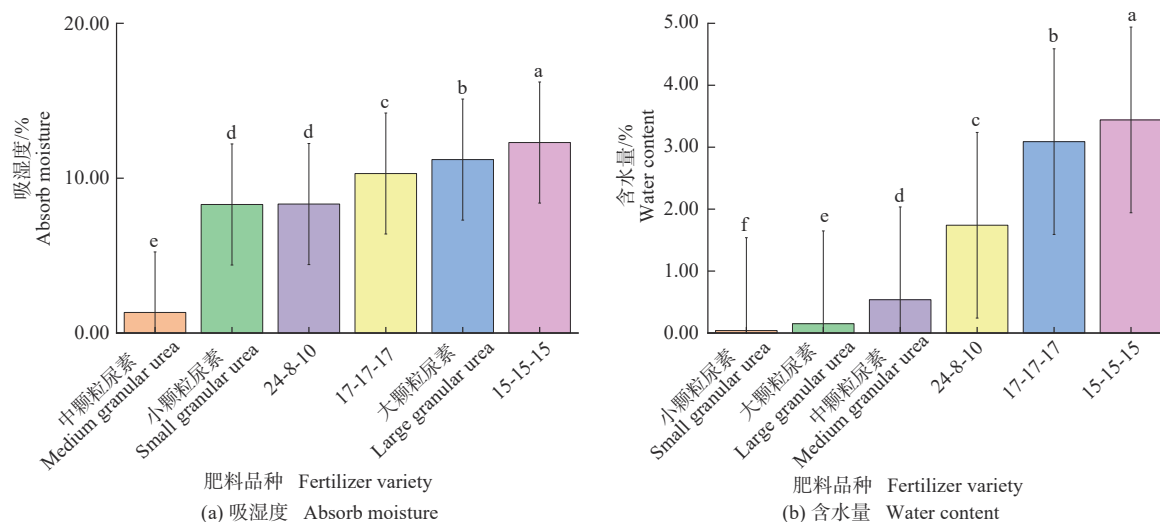


图2 6种肥料颗粒的吸湿度与含水率

Fig. 2 Moisture absorption and water content of six fertilizer particles

致,吸湿度高的肥料含水率也高。如15-15-15吸湿度最高,也易受潮变质^[39]。

2.1.4 肥料颗粒堆密度、球形度与休止角

从图3可知,6种肥料堆密度变化范围在65.36%~92.00%,其中复合肥高于尿素,而大颗粒尿素最低。球形度变异范围在87.00%~94.77%,差异不是很大,大颗粒尿素和中颗粒尿素显著高于其他4种产品,其他4种产品之间没有差异。而六种肥料的休止角之间存在较大差异,变异范围为22.12°~35.67°,最小的是小颗粒尿素,为22.12°,其次是15-15-15,为28.23°;其余4种产品没有差异。

在颗粒尿素中,球形度高的尿素,堆密度也高,成球率最大。球形度越高,成圆度好,越便于播撒^[37]。复合肥中,3种肥料的球形度与堆密度增长趋势吻合,肥料的球形度越高,其堆密度也越高。

休止角的大小与颗粒的流动性有关,休止角越小,其与无人机机壁的摩擦也越小,流动性越大,播撒效率越高。休止角与粉粒之间的黏附性有关,可以反映颗粒流动的难易程度,休止角小则流动性好。一般认为休止角 $\alpha < 30^\circ$ 时流动性很好, $\alpha > 45^\circ$ 时流动性差^[23]。从图3(c)中可知,小颗粒尿素的休止角只有22.12°,是流动性最好的,其次是15-15-15的休止角 $< 30^\circ$ ^[40]。

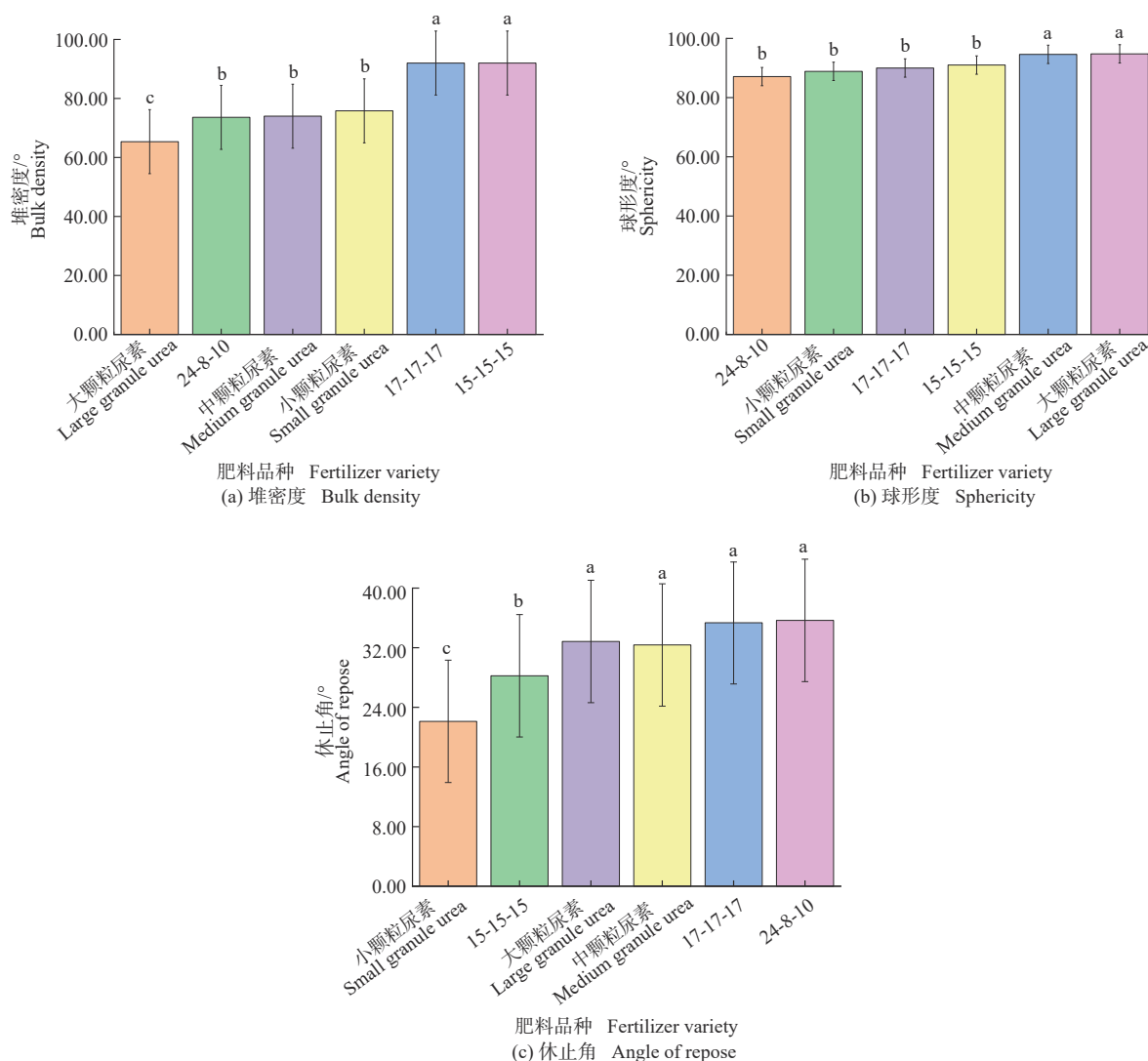


图3 6种肥料颗粒的堆密度、球形度与休止角

Fig. 3 Particle sphericity and bulk density of six kinds of fertilizers

2.1.5 肥物理化性质的相关性分析

上述分析发现,肥料的8种物理性状之间有一

些关系,但关系并不清晰。进一步分析了各个指标间的相关性发现,堆密度仅与球形度、含水率、

休止角显著相关,其中与球形度呈正相关,而与含水率、休止角呈负相关(表3)。强度仅与休止角为显著正相关,与其他指标无相关性。球形度除过与堆密度正相关,也与含水率呈负相关。吸湿度

与其他指标均不相关。对于含水量来说,堆密度与球形度与其呈显著性水平,为负相关。比重也与休止角呈正相关。休止角与堆密度呈负相关,却与含水量呈正相关(表3)。

表3 肥料理化性质的相关性

Table 3 Seven physical and chemical properties of fertilizers, such as strength、specific gravity and angle of repose

	堆密度 Bulk density	强度 Strength	球形度 Sphericity	吸湿度 Wettability	含水率 Moisture content	比重 Proportion	休止角 Angle of repose
堆密度 Bulk density	1						
强度 Strength	-0.564	1					
球形度 Sphericity	0.950**	-0.426	1				
吸湿度 Wettability	-0.315	0.574	-0.366	1			
含水率 Moisture content	-0.918**	0.510	-0.820**	0.108	1		
比重 Proportion	0.039	0.633	0.122	0.436	0.017	1	
休止角 Angle of repose	-0.770*	0.926**	-0.662	0.571	0.729*	0.533	1

注: *为差异显著, $P \leq 0.05$, **为差异极显著, $P \leq 0.01$ 。表5同。

Note: * indicates significant difference, $P \leq 0.05$, ** indicates extremely significant difference, $P \leq 0.01$. The same as Table 5.

2.2 肥料与无人机撒播适配性测定

2.2.1 不同飞行参数下各种肥料施肥均匀性的差异

2.2.1.1 飞行高度 试验将飞行速度控制到5 m/s,撒播盘转速控制到900 r/min,通过从2~6 m调整飞行高度进行不同肥料的撒肥均匀性差异验证。结果表明,每种肥料均匀度最大时的飞行高度均不同,大颗粒尿素在3 m时撒播均匀度可达84.37%,中颗粒尿素为4 m时可达83.26%,小颗粒尿素也为4 m时撒播均匀度可达78.98%。17-17-17复合肥在2~3 m时撒播均匀度最高,也仅达到78.25%,15-15-15在3 m时,撒播均匀度可达84.26%,而24-8-10复合肥却表现出在飞行高度4 m和6 m时撒播均匀度最高(图4)。

2.2.1.2 飞行速度 试验将飞行高度控制到4 m,撒肥盘转速控制到900 r/min,通过从3~7 m/s调整飞行速度进行不同肥料的撒肥均匀性差异验

证。结果表明,每种肥料均匀度最大时的飞行速度均不同,3种尿素均在4 m/s的速度下达到80%以上的均匀性,速度过快均匀度会显著下降。17-17-17复合肥和15-15-15复合肥在各个速度下均可达到80%以上的撒播均匀性,但当速度控制到6 m/s时均匀性可达到90%以上。而24-8-10复合肥在3 m/s和4 m/s时撒播均匀性可达到90%以上(图5)。

2.2.1.3 无人机离心盘转速 试验将飞行高度控制在4 m,飞行速度控制到5 m/s,通过从500 r/min到1300 r/min调整飞行的离心盘转速进行不同肥料的撒肥均匀性差异验证。结果表明,每种肥料均匀度最大时的离心盘转速均不同,大颗粒尿素在700 r/min时撒播均匀度可达82.34%,中颗粒尿素为900 r/min时可达81.42%,小颗粒尿素也为700 r/min时撒播均匀度可达82.23%。17-17-17复合肥在1300 r/min时撒播均匀度最高,也仅达到

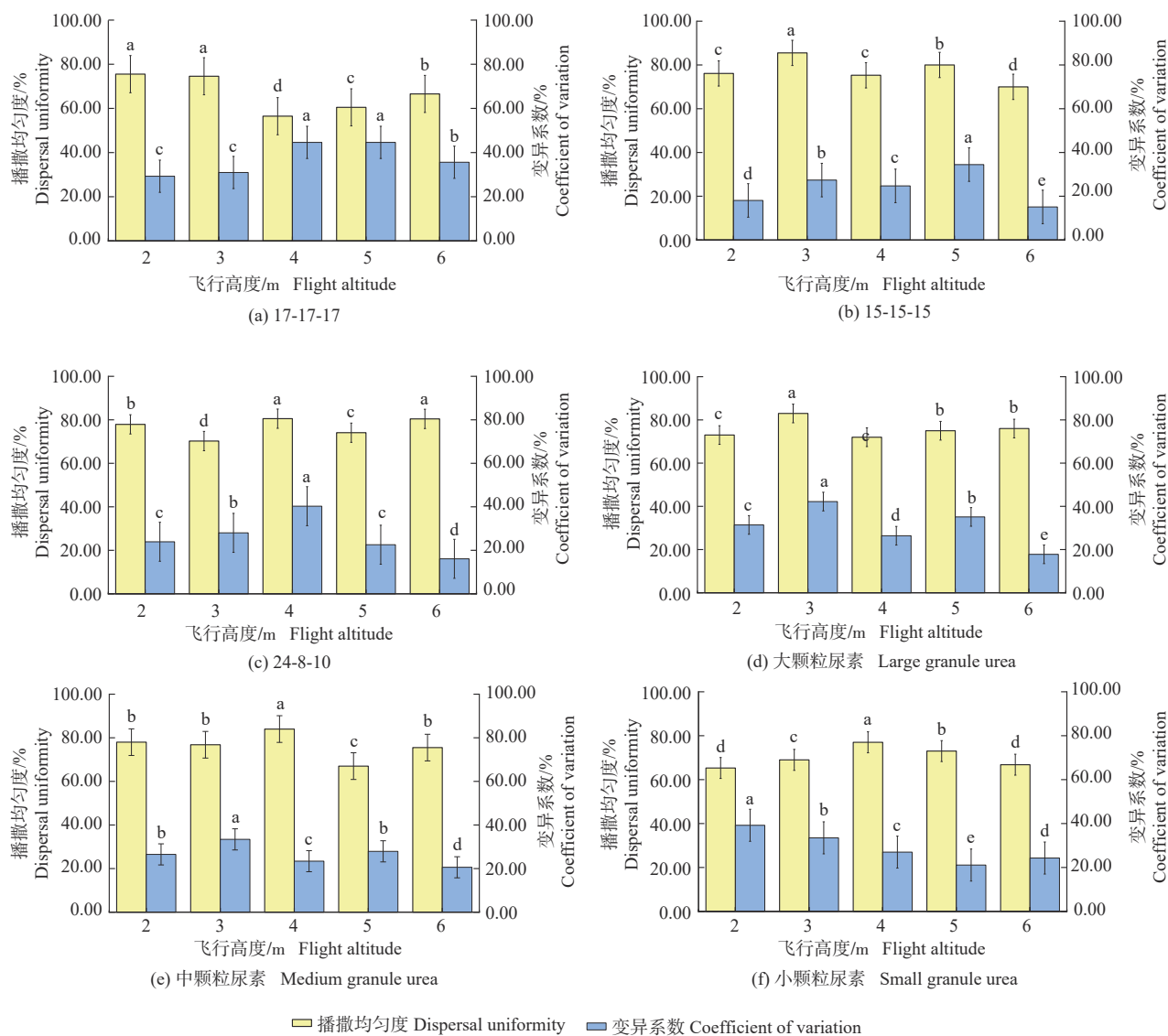


图4 6种肥料在不同飞行高度的撒施量与变异系数

Fig. 4 Sowing amount and coefficient of variation of six fertilizers at different flight altitudes

77.69%, 15-15-15在1100 r/min时撒播均匀度可达80%以上,而24-8-10复合肥却表现出在700 r/min时撒播均匀度最高(图6)^[42-46]。

综合上述分析发现,每种肥料适宜的作业参数存在较大差异。虽然是在3种参数独立试验下获得,但仍可作为参考性作业指标。其中大颗粒尿素最佳飞行高度为3 m、飞行速度为4 m/s、离心盘转速为700 r/min;中颗粒尿素最佳飞行高度为4 m、飞行速度为4 m/s、离心盘转速为900 r/min。小颗粒尿素最佳飞行高度为4 m、飞行速度为4 m/s、离心盘转速为700 r/min。15-15-15最佳飞行高度为3 m、飞行速度为6 m/s、离心盘转速为1100 r/min。

17-17-17最佳飞行高度为2~3 m、飞行速度为6 m/s、离心盘转速为1300 r/min。24-8-10最佳飞行高度为4和6 m、飞行速度为3 m/s、4 m/s、离心盘转速为700 r/min(表4)。

2.3 肥料物理性状与施肥均匀性的关系

为了明确影响施肥均匀度的肥料物理形状指标,我们用6种肥料的8个指标分别与均匀度建立相关关系。由表4可知,肥料的均匀度与比重、休止角、堆密度的相关性最大,分别为0.576、0.576和0.495,相关性较为显著。而且都是正相关,说明比重与堆密度越大的肥料,其肥料的均匀度略高。休止角越大均匀性越好。

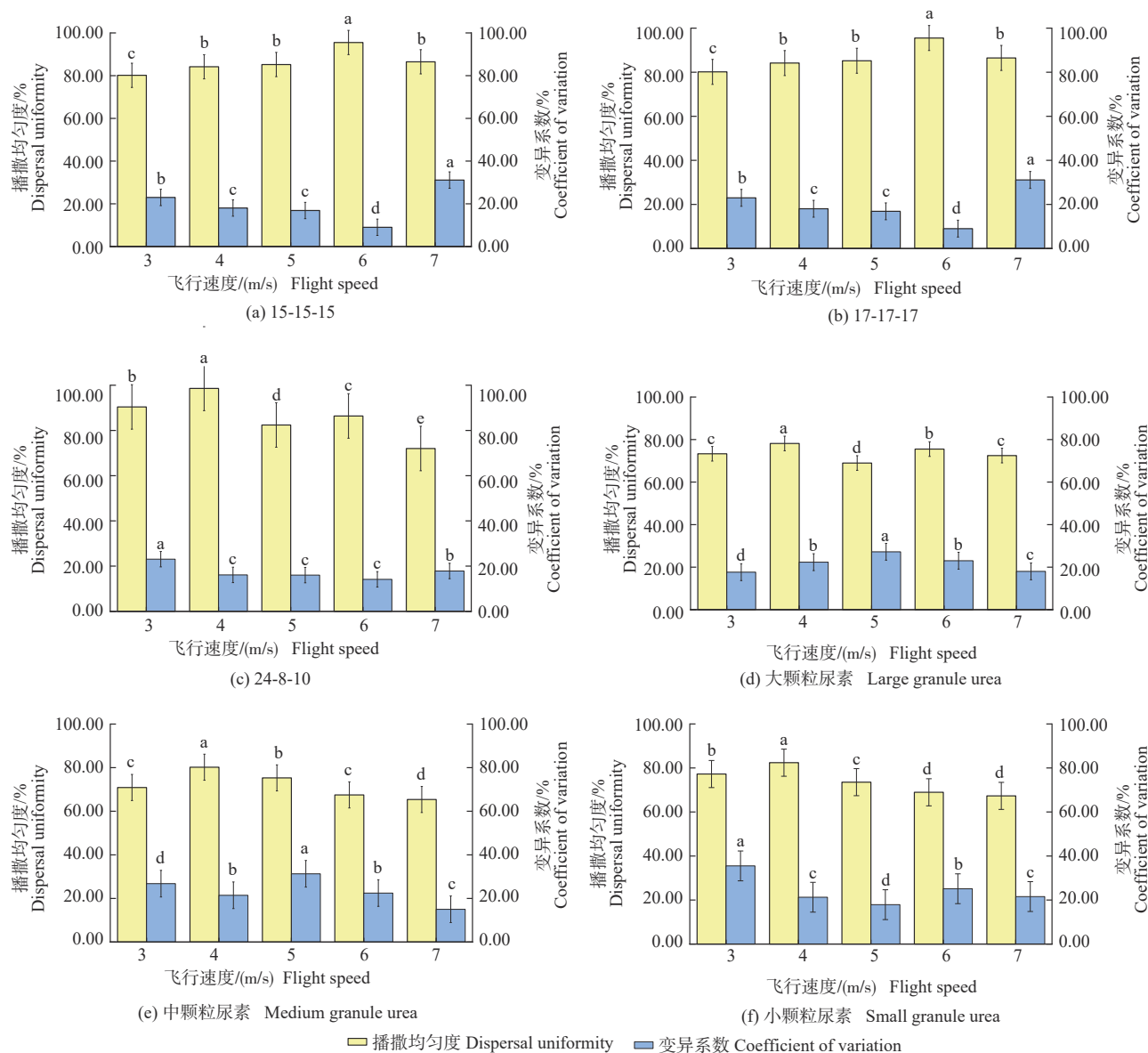


图 5 6 种肥料在不同飞行速度的撒施量与变异系数

Fig. 5 Sowing amount and coefficient of variation of six kinds of fertilizers at different flight speeds

由表 5 可知,施肥的均匀度受这几种因素的影响,而这几种因素也在互相关联。施肥均匀度与强度和堆密度显著相关,且都呈正相关。肥料的强度越大,其排肥均匀度越大;堆密度越大,其肥料的施肥均匀度越大,效果越好。其他的理化性质中,休止角与含水量对施肥均匀度呈显著相关,呈正相关。休止角越大,其肥料的施肥均匀度相对越大。

3 讨论

3.1 不同肥料的物理性状差异

肥料的造粒工艺、养分配比等均会影响肥料的

物理性状^[47-48]。在本研究中选用的 6 种肥料可将其分为尿素和复合肥两类,两类肥料的造粒工艺均为转鼓工艺,因此,尿素间的物理性状差异源于粒径分布,而复合肥的物理性状差异可能源于原料选择及养分配比。

在本研究中,大、中、小颗粒尿素的粒径分布各不相同,大颗粒尿素有 60.13% 集中在 3~4 mm,中颗粒尿素有 63.27% 集中在 2~3 mm,而小颗粒尿素有 85.87% 集中在 1~2 mm,相对应的颗粒强度分别为 31.44、26.70 和 5.90 N,说明本研究中尿素的粒径大小影响颗粒强度,粒径越大颗粒强度越高,这与蔡沛

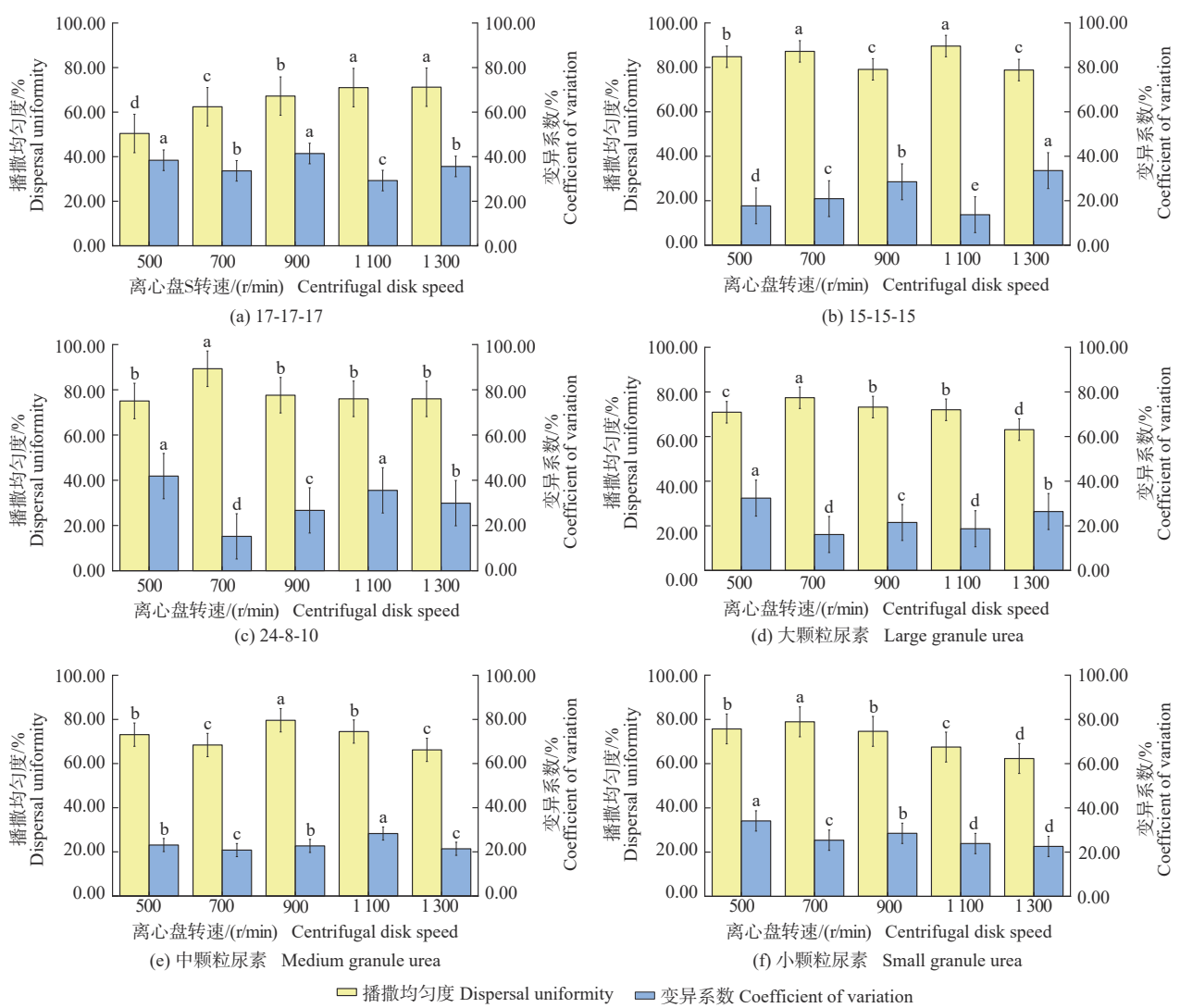


图 6 6种肥料在不同离心盘转速的撒播均匀度与变异系数

Fig. 6 Dispersion uniformity and variation coefficient of six kinds of fertilizers at different centrifugal pan speeds

	表 4 不同肥料的最佳无人机作业参数		
	Table 4 Optimal UAV operation parameters for different fertilizers		
	飞行高度/m Flight altitude	飞行速度/(m/s) Flight speed	离心盘转速/(r/min) Centrifugal disk speed
15-15-15	3	6	1 100
17-17-17	2~3	6	1 300
24-8-10	4、6	3、4	700
小颗粒尿素 Small granule urea	4	4	700
中颗粒尿素 Medium granule urea	4	4	900
大颗粒尿素 Large granule urea	3	4	700

表 5 肥料物理性状与施肥均匀性的关系

Table 5 Relationship between physical properties of fertilizer and uniformity of fertilization

变量 Category	非标准化回归系数 Non-standardized regression coefficients		标准化回归系数 Standardized regression coefficients	<i>t</i>	<i>R</i> ²
	<i>B</i>	标准差 Standard deviation			
常量 Constant	65.120	5.535		11.765	
强度 Strength	0.204	0.049	1.098**	4.128	
比重 Proportion	-3.732	4.999	-0.203	-0.747	
休止角 Angle of repose	0.075	0.034	0.105*	2.202	0.996
含水率 Water content	0.086	0.036	0.108*	2.373	
堆密度 Bulk densit	0.049	0.012	0.124**	4.289	
吸湿度 Wettability	0.027	0.030	0.028	0.895	

辰等^[49]研究结果相似。尿素的球形度与堆密度密切相关,球形度越高,堆密度越高,成圆度好,越便于播撒,而球形度与含水率、休止角呈负相关,休止角与强度呈正相关,这与王宏伟^[50]的研究相似。

3种复合肥的粒径分布中各不相同,15-15-15有55.93%集中在2~3 mm,17-17-17有51.63%集中在2~3 mm,而24-8-10有38.63%集中在2~3 mm,其强度大小分别为60.04、54.32和34.31 N,15-15-15与17-17-17的强度接近,比重也几乎相同,15-15-15的吸湿性达到12.30%,17-17-17在9.35%。复合肥的吸湿度与含水量趋势一致,吸湿度高的肥料含水率也高。这与张卫青等^[51]研究相似。

复合肥与大、小、中颗粒尿素,这两类肥料的理化性质各不相同,含水量高的颗粒尿素,吸湿度不一定高,但复合肥的含水量与吸湿度相关。肥料的材料不同,其理化性质存在一定差异。

3.2 肥料物理性状对施肥均匀度的影响

本研究发现,6种肥料中,其颗粒粒径越大,排肥效果越好,且肥料强度越大,易粉碎程度越低,其排肥均匀度越高,这与都鑫等^[52]的研究结果相似。此外,肥料理化性质中的堆密度也与排肥均匀度密切相关。研究指出堆密度的大小通过影响肥料在料箱中的下肥速度,进而影响排肥的均匀度。本研究通过调节不同转速也发现了相似的现象,例如17-17-17肥料在高转速下施肥均匀度较高,而颗粒尿素在转速低的情况下施肥均匀度较高,这很可能就是肥料自身的堆密度特性所致。关于肥料休止

角对施肥均匀度的影响已经有了普遍认识,在无人机飞行速度较大的情况下,会严重影响肥料的飞行轨迹,此时选择休止角大的肥料比较适合。原因在于如果肥料休止角较小,代表其流动性较好,而流动性越好的肥料受飞行速度的影响更大,飞行速度越快,小颗粒尿素的排肥均匀度越低^[53]。但在无人机飞行速度较低的情况下应选择休止角较小的肥料,因为此时休止角大于30°的肥料流动性不高,进而影响施肥均匀度。肥料比重也与肥料排肥均匀度密切相关,因为肥料比重与强度密切相关,强度与球形度具有一定的关系。在肥料撒施过程中,比重大的肥料其球形度高,且强度大,不易挤压粉碎,不易发生离心盘堵塞而带来撒播困难、无法正常播撒的情况。15-15-15与17-17-17在各参数调整的过程中,更易达到80%的排肥均匀度,可能与其具有较高的强度和比重相关,这与徐春保等^[54]的研究有相似之处。

4 结 论

本研究中6种肥料的理化性质存在明显差异,肥料的强度、比重、堆密度与播撒均匀度关系密切。研究初步得出15-15-15播撒效果表现最好,小颗粒尿素的吸湿性、含水率和休止角表现最低。不仅如此,同种肥料的物理性状也存在极大变异,例如6种肥料的吸湿性、含水率、堆密度和休止角均存在较大变异。

肥料颗粒理化性质与无人机施肥均匀性密切

相关,其中比重、休止角及堆密度等指标是关键因素。不同肥料适配的最优参数不同,在本研究的飞行条件下,15-15-15在4 m飞行高度、5 m/s飞行速度,1 100 r/min转速下播撒均匀度最高,相较于颗粒肥料,复合肥的均匀度相对更好,撒肥量更大,变异系数较小。

本研究的飞行参数设计初步得出几种肥料在不同参数下的播撒效果,关于肥料的无人机适配和精准排肥还需要进一步的探讨研究。

参考文献 References

- [1] 彭琳. 中国化肥施用粮食生产的进程、前景与布局[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(1): 14-18
Peng L. Progressive process, prospects and distribution of fertilizer use and grain production in China [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2000, 21(1): 14-18 (in Chinese)
- [2] 王攀, 李谷成, 刘迪, 高扬. 不同类型农技推广方式对农户科学施肥技术采纳行为的影响: 兼论社会信任的调节效应[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(2): 150-157
Wang P, Li G C, Liu D, Gao Y. Influence of agricultural extension modes on farmers' adoption of scientific fertilization techniques: The moderating effect of social trust [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(2): 150-157 (in Chinese)
- [3] 张福锁, 陈新平, 马文奇. “现代农业”时代谈化肥[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 1-3
Zhang F S, Chen X P, Ma W Q. Discussion on fertilizer in an era of modern agriculture [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 1-3 (in Chinese)
- [4] 邢绪坡, 马旭, 陈林涛, 李宏伟, 温志成, 曾广智. 固体颗粒肥料物理特性的试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(9): 125-130
Xing X P, Ma X, Chen L T, Li H W, Wen Z C, Zeng G Z. Experimental study on physical characteristics of granular fertilizer [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(9): 125-130 (in Chinese)
- [5] 朱庆莹. 水稻机械化作业对农业生产效率的影响[J]. 农机使用与维修, 2024(10): 31-34
Zhu Q Y. A study on the impact of mechanized rice operations on agricultural productivity [J]. *Agricultural Machinery Using & Maintenance*, 2024(10): 31-34 (in Chinese).
- [6] 顿国强, 于春玲, 郭艳玲, 李海山, 杨永振, 陈海涛, 纪文义. 间隙啮合渐开线齿轮排肥器的结构优化仿真及试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1): 171-179
Dun G Q, Yu C L, Guo Y L, Li H S, Yang Y Z, Chen H T, Ji W Y. Optimization simulation and experiment of structure of interval meshing involute gear fertilizer apparatus [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(1): 171-179 (in Chinese)
- [7] 梁方, 杨淦光, 许丰, 赵宏伟, 马丽筠, 岑光毓, 马宗睿. 外槽轮式播种机播量控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 153-157
Liang F, Yang G G, Xu F, Zhao H W, Ma L J, Cen G Y, Ma Z R. The seeding rate control system design and experiment of the external groove wheel seeder [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(10): 153-157 (in Chinese)
- [8] 朱德峰, 陈惠哲. 水稻机插秧发展与粮食安全[J]. 中国稻米, 2009, 15(6): 4-7
Zhu D F, Chen H Z. Food security and development of rice mechanized transplanting technology in China [J]. *China Rice*, 2009, 15(6): 4-7 (in Chinese)
- [9] 刘婧. 传统农业机械施肥装置与新型农业机械施肥装置的差异[J]. 农业开发与装备, 2021(9): 20-21
Liu J. Difference between traditional agricultural machinery fertilization device and new agricultural machinery fertilization device [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2021(9): 20-21 (in Chinese)
- [10] 李红, 汤攀, 陈超, 张志洋, 夏华猛. 中国水肥一体化施肥设备研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 200-209
Li H, Tang P, Chen C, Zhang Z Y, Xia H M. Research status and development trend of fertilization equipment used in fertigation in China [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(2): 200-209 (in Chinese)
- [11] 王磊, 周建平, 许燕, 李志磊, 张斌. 农用无人机的应用现状与展望[J]. 农药, 2019, 58(9): 625-630, 634
Wang L, Zhou J P, Xu Y, Li Z L, Zhang B. Application status and prospect of agricultural UAV [J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(9): 625-630, 634 (in Chinese)
- [12] 张厚东, 王伟, 徐朋飞, 廖结安, 王朴. 无人机式毛叶苕子撒播装置设计和试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 142-146
Zhang H D, Wang W, Xu P F, Liao J A, Wang P. Design and motion analysis of the UAV Mao leaf pea seeding device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(6): 142-146 (in Chinese)
- [13] 贾瑞昌, 唐楚鹏, 张亚莉, 刘峰, 祁媛, 陶婉琰. 一种基于无人机的颗粒抛撒装置. 中国, CN109729800A [P]. 2019-05-10
Jia R C, Tang C P, Zhang Y L, Liu F, Qi Y, Tao W T. A Drone-based Particle Throwing Device. China, CN109729800A [P]. 2019-05-10
- [14] 包胜军. 一种播撒装置及飞行播撒装置. 中国, CN205336838U [P]. 2016-06-29
Bao S J. A spreading device and a flying spreading device. China, CN205336838U [P]. 2016-06-29
- [15] 董思永, 阚向锦, 孙宗训, 于德科. 梨园“绿肥+配方肥+机械深施”施肥“三新”模式探索[J]. 果农之友, 2024(8): 82-84
Dong S Y, Kan X J, Sun Z X, Yu D K. Exploration on “three new” fertilization mode of “green Manure+Formula Manure+Mechanical deep application” in pear orchard [J]. *Fruit Growers' Friend*, 2024(8): 82-84 (in Chinese)
- [16] 杨献, 刘辉. 农业机械精准施肥技术研究与应用[J]. 中国农机装备, 2024

- (4): 31-33
- Yang X, Liu H. Research and application of precision fertilization technology with agricultural machinery [J]. *China Agricultural Machinery Equipment*, 2024(4): 31-33 (in Chinese)
- [17] 刘鑫. 单旋翼植保无人机旋翼流场下洗气流速度分布规律研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019
- Liu X. Study on velocity distribution law of downwash airflow in rotor flow field of single-rotor plant protection UAV[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [18] 肖汉祥, 李燕芳, 袁龙宇, 张振飞. 我国农用无人机在水稻生产中的应用现状与展望[J]. 广东农业科学, 2021, 48(8): 139-147
- Xiao H X, Li Y F, Yuan L Y, Zhang Z F. Application and prospect of China agricultural unmanned aerial vehicle in rice production [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(8): 139-147 (in Chinese)
- [19] 曹洪伟. 无人机在农业机械精准施肥中的应用[J]. 河北农机, 2024(6): 42-44
- Cao H W. Application of UAV in precision fertilization of agricultural machinery [J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2024 (6): 42-44 (in Chinese)
- [20] 韩玉宝, 姬江涛, 张瑞瑞. 固体颗粒撒施无人机槽轮结构优化设计与试验[J/OL]. 农机化研究, 2024(10): 1-10. [2024-06-10]. <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.20240606.002>
- Han W B, Ji J T, Zhang R R. Optimization design and test of sheave structure of UAV for solid particle sprinkling [J/OL]. *Agricultural Mechanization Research*, 2024(10): 1-10. [2024-06-10]. <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.20240606.002> (in Chinese)
- [21] Hofstee J W. Handling and spreading of fertilizers: Part 5, the spinning disc type fertilizer spreader [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1995, 62(3): 143-162
- [22] 张泽丽, 王昭雄. 缓释肥料在水稻土中施用效果研究[J]. 四川农业大学学报, 1995, 13(3): 259-265
- Zhang Z L, Wang Z X. Research in effect of slow release fertilizer in the paddy soil[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 1995, 13(3): 259-265 (in Chinese)
- [23] 刘恩城. 有机肥撒施效果影响因素及设备研究[J]. 黑龙江粮食, 2023(7): 115-117
- Liu E C. Study on influencing factors and equipment of organic fertilizer spreading effect[J]. *Heilongjiang Grain*, 2023(7): 115-117 (in Chinese)
- [24] 马昕, 杨艳明, 刘智蕾, 孙彦坤, 于彩莲, 彭显龙. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1095-1103
- Ma X, Yang Y M, Liu Z L, Sun Y K, Yu C L, Peng X L. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 1095-1103 (in Chinese)
- [25] 猛强, 张宏, 董学璋, 拜海龙, 姚杰, 兰海鹏. 基于文献计量学的施肥机械领域研究进展[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 91-100
- Zhang M Q, Zhang H, Dong X Z, Bai H L, Yao J, Lan H P. Research progress of fertilizing machinery based on bibliometrics [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(2): 91-100 (in Chinese)
- [26] 陈鹏飞. 无人机在农业中的应用现状与展望[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 399-406
- Chen P F. Applications and trends of unmanned aerial vehicle in agriculture [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2018, 44(4): 399-406 (in Chinese)
- [27] 高丽萍, 陈慧, 刘嘉诚, 秦永豪, 廖庆喜, 廖宜涛, 王天尧. 油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 87-97
- Gao L P, Chen H, Liu J C, Qin Y H, Liao Q X, Liao Y T, Wang T Y. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 87-97 (in Chinese)
- [28] 陆雨, 徐南清, 段建设. 机械侧深施肥下水稻产量和肥料利用效率研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(14): 19-23,30
- Lu Y, Xu N Q, Duan J S. Study on rice yield and fertilizer use efficiency under deep fertilization on mechanical side [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(14): 19-23,30 (in Chinese)
- [29] 许秀程. 如何有效提高肥料在化工生产中的作用[J]. 磷肥与复肥, 1999, 14(3): 6-11
- Xu X C. How to effectively improve the role of fertilizers in chemical production[J]. *Phosphate Fertilizers and Compound Fertilizers*, 1999, 14(3): 6-11 (in Chinese)
- [30] 吴建富, 施翔, 肖青亮, 许南南. 我国肥料利用现状及发展对策[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(5): 725-727
- Wu J F, Shi X, Xiao Q L, Xu X N. Present situation of utilization of fertilizers in China and development strategy for fertilizers [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2003, 25(5): 725-727 (in Chinese)
- [31] 杨青林, 桑利民, 孙吉茹, 季志强, 袁文利, 郭玉炜, 盖颜欣. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学, 2011, 39(7): 690-692
- Yang Q L, Sang L M, Sun J R, Ji Z Q, Yuan W L, Guo Y W, Gai Y X. Current situation of fertilizer use in China and the method to improve chemical fertilizer utilization efficiency [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(7): 690-692 (in Chinese)
- [32] 伍杂日曲, 郭长春, 李飞杰, 吕旭, 舒川海, 孙永健, 杨志远, 马均. 减氮和机械侧深施肥对机插杂交稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 1034-1041
- Wu Z, Guo C C, Li F J, Lv X, Shu C H, Sun Y J, Yang Z Y, Ma J. Effects of nitrogen reduction and mechanical side-deep fertilization on yield and nitrogen uptake and utilization of mechanically transplanted hybrid rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(5): 1034-1041 (in Chinese)
- [33] 许学宏, 王红慧. 肥料对农产品品质的影响综述[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(4): 66-68
- Xu X H, Wang H H. Effect of fertilizer on the quality of agricultural products

- [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(4): 66-68 (in Chinese)
- [34] 王海毕, 李军政, 刘从, 宋世圣, 陈丽美, 曾纪铭. 基于离散元法的复合肥参数标定[J]. 农机化研究, 2024, 46(11): 191-196
- Wang H B, Li J Z, Liu C, Song S S, Chen L M, Zeng J M. Calibration of parameters of compound fertilizer based on discrete element method [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(11): 191-196 (in Chinese)
- [35] 常红英, 谢崇津, 徐炜新. 颗粒分布均匀性定量金相分析方法[C]. 2007 中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2007: 2
- Chang H Y, Xie C J, Xu W X. Quantitative metallographic analysis method for particle distribution uniformity [C]. In: *Proceedings of the 2007 China Iron and Steel Annual Conference*. Beijing: Chinese Society for Metals, 2007: 2 (in Chinese)
- [36] 王迪轩, 何永梅, 王雅琴. 简明肥料使用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018
- Wang D X, He Y M, Wang Y Q. *A Concise Manual of Fertilizer Use* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018 (in Chinese)
- [37] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 朱彤, 彭心怡, 王怡苏. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 30-38
- Wu M C, Cong J L, Yan Q, Zhu T, Peng X Y, Wang Y S. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(23): 30-38 (in Chinese)
- [38] 王建立, 关二旗, 张庭静. 粒度对小麦颗粒粉理化特性和面条品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2024(10): 1-16
- Wang J L, Guan E Q, Zhang T J. Effect of particle size on physicochemical properties and noodle quality of wheat grain flour [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2024(10): 1-16
- [39] 谢灵, 王军, 许毅隼. 高强度有机物料颗粒化还田下贫瘠农田土壤温室气体排放效应[J]. 生态学杂志, 2024: 1-14
- Xie L, Wang J, Xu Y J. Effect of soil greenhouse gas emissions of high-intensity organic material granulation in barren farmland under the field [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024: 1-14
- [40] 樊成赛, 何瑞银, 施印炎, 王建林, 徐高明. 有机无机混合肥料离散元参数标定方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(2): 402-413
- Fan C S, He R Y, Shi Y Y, Wang J L, Xu G M. Study on discrete element parameter calibration method for organic inorganic mixed fertilizers [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2024, 47(2): 402-413 (in Chinese)
- [41] 苏东旭. 农用无人机肥料颗粒变量撒播系统设计与效果评价方法研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023
- Su D X. Study on the design and effect evaluation method of fertilizer particle variable sowing system for agricultural UAV [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [42] 罗锡文, 李继宇, 周志艳, 兰玉彬, 臧英, 曾山, 陈盛德, 吴应金, 胡浩文. 一种适于无人机撒播作业的机载装置及撒播方法. 中国, CN104176254A[P]. 2014-12-03
- Luo X W, Li J N, Zhou Z Y, Lan Y B, Zang Y, Zeng S, Chen S D, Wu Y Q, Hu H W. Airborne device and spreading method suitable for UAV spreading operation. China, CN104176254A[P]. 2014-12-03
- [43] Alameen A A, Al-Gaadi K A, Tola E. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 160: 31-39
- [44] Feng S, Cao Y L, Xu T Y, Yu F H, Zhao D X, Zhang G S. Rice leaf blast classification method based on fused features and one-dimensional deep convolutional neural network [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3207
- [45] Yuan Q. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization [J]. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18): 21-27
- [46] Guan S L, Fukami K, Matsunaka H, Okami M, Tanaka R, Nakano H, Sakai T, Nakano K, Ohdan H, Takahashi K. Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 112
- [47] Takahashi K. Assessing correlation of High-Resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 112
- [48] 方伟明. 复合肥料生产工艺的创新发展研究[J]. 粮油与饲料科技, 2024 (3): 197-199
- Fang W M. Research on innovation and development of compound fertilizer production process [J]. *Grain, Oil and Feed Technology*, 2024 (3): 197-199 (in Chinese)
- [49] 蔡沛辰, 毛雪松, 刘云龙. 再生填料单颗粒破碎-强度-尺寸-形态效应研究[J]. 中国公路学报, 2024: 1-21
- Cai P C, Mao X S, Liu Y L. Study on the effect of single particle crushing-strength-size-morphology of recycled filler [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024: 1-21 (in Chinese)
- [50] 王宏伟. 基于离散元法的成熟期小麦籽粒和植株建模方法及切割过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2024
- Wang H W. Modeling method and cutting process simulation analysis of mature wheat grain and plant based on discrete element method [D]. Changchun: Jilin University, 2024 (in Chinese)
- [51] 张卫青, 梁伟, 郭洪位. 复方产乳灵颗粒成型工艺优化及其吸湿性研究[J]. 中成药, 2024, 46(8): 2537-2541
- Zhang W Q, Liang W, Guo H W. Optimization of molding process and hygroscopicity of compound lactation granules [J]. *Proprietary Chinese Medicines*, 2024, 46(8): 2537-2541 (in Chinese)
- [52] 都鑫, 刘彩玲, 姜萌. 基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 141-149
- Du X, Liu C L, Jiang M. Parameter calibration of Bonding model of coated fertilizer based on discrete element [J]. *Transactions of the CSAM*, 2022, 53(7): 141-149 (in Chinese)
- [53] 田祥州, 贺福强, 陈发江. 基于休止角标定不同含水率木粉离散元参数[J/OL]. 中国农业科技导报, 2024: 1-14
- Tian X Z, He F Q, Chen F J. Calibration of discrete element parameters

of wood flour with different moisture content based on angle of repose[J/OL]. *China Agricultural Science and Technology Review*, 2024: 1-14 (in Chinese)

- [54] 徐春保, 董万静, 李浩鹏. 离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器设计与试验[J/OL]. *农业工程学报*, 2024: 1-13. [2024-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.s.20241014.0906.050.html>

Xu C B, Dong W J, Li H P. Design and test of high-speed precision fertilizer discharger for extruded rapeseed with centrifugal cavity disc[J/OL]. *Transactions of the CSAE*, 2024: 1-13. [2024-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.s.20241014.0906.050.html>

责任编辑: 袁文业



第一作者简介: 周圆, 中国农业大学资源利用与植物保护研究生。主要研究不同肥料的理化性质。参与支撑华北绿色超吨粮的高效功能肥料创制与应用和巢湖面源污染关键技术研究项目 1 项。



通讯作者简介: 张卫峰, 博士, 中国农业大学教授、博士生导师, 曲周实验站站长, 致力于作物养分资源宏观管理研究。先后主持国家、省部级及地方重点研发计划或项目 32 项, 参与 973 计划、农业部农业科研人才支撑计划和国际合作等研究项目 38 项。完成政策建议 60 余份, 以第一或通讯作者发表中英文论文 130 余篇, 其中 SCI 论文 40 余篇, 包括 *Nature*、*Nature•Food* 等顶级期刊。2018 年获得世界肥料工业协会 (IFA) 的 Norman*Borlaug 奖。2023 年获得农业部神农英才青年人才、研究生国家级教学成果特等奖等。