doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.025

面向无人飞机播撒作业沉积分布测试的颗粒肥料收集装置设计与试验

周志艳[1,2]　范小龙[1,3]　林键沁[1,4]　邓孔洪[1,4]　刘梓博[1,4]　姜　锐[1,5]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.岭南现代农业科学与技术广东省实验室,广州 510642;
3.广东省农业人工智能重点实验室,广州 510642;4.广东省农业航空应用工程技术研究中心,广州 510642;
5.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642)

摘要:采用无人飞机进行播撒作业,在农业生产中的应用越来越广泛。颗粒肥料沉积分布均匀性是衡量播撒作业性能的重要指标,在沉积分布测试中颗粒肥料收集的完整性对测试结果的准确性至关重要。为了提高测试中颗粒肥料的收集率,对颗粒肥料收集装置的材质及结构参数进行优选试验。设计了聚氯乙烯、橡胶、泡沫垫和牛津布的弹跳高度对比试验,试验结果表明,牛津布的弹跳高度最低,对尿素的平均弹跳高度为 2.12 cm,对复合肥的平均弹跳高度为 2.27 cm。设计了常规的硬质材料(聚乙烯塑料、硬纸盒)以及 4 种柔性材料对颗粒肥料收集率对比的试验,试验结果表明,柔性材料相较于硬质材料,对尿素和复合肥的收集率大大提高,其中牛津布对尿素和复合肥的收集率分别达到 96.93% 和 99.41%。采用牛津布分别设计锥形和弧形 2 种形状的收集装置,设计了台架试验进行颗粒肥料收集率对比,台架试验结果表明,锥形收集装置的收集率优于弧形收集装置,锥形收集装置对尿素和复合肥的收集率分别为 96.57% 和 98.25%,比常规的硬质聚乙烯塑料箱的收集率分别增加约 45.76、42.68 个百分点。开展了无人飞机播撒作业的颗粒肥料沉积分布特性田间对比试验,田间试验结果表明,在用量 75、150、225 kg/hm^2 水平下,采用柔性材料的锥形收集装置收集尿素的收集量比硬质塑料箱分别增加 0.75、1.41、2.23 g;在同样的水平下,锥形收集装置收集复合肥的收集量比硬质塑料箱分别增加 1.13、2.37、3.67 g。采用牛津布制作的锥形收集装置能有效减少颗粒肥料的二次弹跳,显著提高沉积分布测试中颗粒肥料收集的准确性。

关键词:无人飞机;播撒;颗粒肥料;沉积分布;柔性材料;收集装置

中图分类号:S224.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0301-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Granular Fertilizer Collection Device for Deposition Distribution Testing of UAV-based Spreader

ZHOU Zhiyan[1,2]　FAN Xiaolong[1,3]　LIN Jianqin[1,4]　DENG Konghong[1,4]　LIU Zibo[1,4]　JIANG Rui[1,5]

(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
2. *Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou* 510642, *China*
3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence, Guangzhou* 510642, *China*
4. *Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application, Guangzhou* 510642, *China*
5. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, South China Agricultural University, Ministry of Education, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: The application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for spreading operations is becoming increasingly widespread in agricultural production. The uniformity of the sediment distribution of granular fertilizers is an important indicator for measuring the performance of spreading operations. In sediment distribution testing, the completeness of granular fertilizer collection was critical to the accuracy of test results. To improve the collection rate of granular fertilizers during testing, optimization experiments on the material and structural parameters of the fertilizer collection device were conducted. A comparative test on the rebound height of different materials—polyvinyl chloride, rubber, foam mat, and Oxford

收稿日期:2025-05-13　修回日期:2025-05-27

基金项目:广东省科技计划项目(2023B0202130001)和广州市重点研发计划项目(2024B03J1324)

作者简介:周志艳(1972—),男,教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail:zyzhou@scau.edu.cn

通信作者:姜锐(1993—),男,副教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail:ruiojiang@scau.edu.cn

fabric—was designed. The test results showed that Oxford fabric had the lowest rebound height, with an average rebound height of 2.12 cm for urea and 2.27 cm for compound fertilizer. A comparative test on the collection rates of granular fertilizers was also conducted by using conventional rigid materials (polyethylene plastic and cardboard) and four types of flexible materials. The results showed that flexible materials significantly improved the collection rates of both urea and compound fertilizer compared with rigid materials. Among them, Oxford fabric achieved the highest collection rates, with 96.93% for urea and 99.41% for compound fertilizer. Two types of collection devices—a conical and an arc-shaped design—were developed by using Oxford fabric. A bench test was designed to compare the collection rates of the different shapes. The results showed that the conical collection device outperformed the arc-shaped one, achieving collection rates of 96.57% for urea and 98.25% for compound fertilizer. Compared with the conventional rigid polyethylene plastic box, this represented an increase of approximately 45.76 percentage points and 42.68 percentage points, respectively. Field tests were conducted to measure the sediment distribution characteristics of granular fertilizers under UAV spreading operations. The results showed that under three application levels of 75 kg/hm^2, 150 kg/hm^2, 225 kg/hm^2, the amount of urea collected by the conical device made of flexible material was 0.75 g, 1.41 g, and 2.23 g more than that collected by the rigid plastic box, respectively. Under the same application levels, the amount of compound fertilizer collected was increased by 1.13 g, 2.37 g, and 3.67 g, respectively. The conical collection device made of Oxford fabric effectively reduced secondary rebounds of granular fertilizers and significantly improved the accuracy of sediment distribution testing.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); spreading; granular fertilizer; deposition distribution; flexible materials; collection devices

0 引言

相比传统人工施肥,采用无人飞机进行播撒作业可节省大量劳动力且效率更高[1],节本增收效果显著,在农业生产中的应用越来越广泛[2]。播撒器的性能直接影响施肥作业的质量[3],而播撒作业的质量与颗粒肥料沉积分布模式(Deposition distribution pattern, DDP)高度相关[4],获取颗粒肥料的沉积分布模式方法通常为:在播撒机作业稳定区域内按标准放置若干收集装置,然后计算区域内每个收集装置颗粒数量,从而得到沉积分布曲线[5-6],通过沉积分布曲线能够计算出播撒器的幅宽、均匀性等特征值,从而进一步分析颗粒的沉积分布模式[7]。对颗粒肥料沉积分布模式的研究能够帮助工作人员优化播撒器的性能和指导田间作业[8-9]。颗粒肥料沉积分布均匀性是衡量播撒作业性能的重要指标[10-11],在沉积分布测试中颗粒肥料收集的完整性对测试结果的准确性至关重要[12-13]。

国内外众多学者[14-17]对地面播撒机进行设计或者优化时,都要通过颗粒物料沉积分布测试来检验播撒器的均匀性,进而探究播撒器的最佳作业参数。对地面机械播撒沉积分布测试时由于作业高度低,通常不需要考虑肥料等颗粒肥料弹跳逃逸,一般会使用塑料箱或者硬质盒作为物料收集装置。

而无人飞机播撒沉积分布测试由于播撒高度的增高,且由于颗粒肥料表面较硬、质地紧密或形状不规则[18],在地面沉积分布时会出现二次弹跳现象,相邻区域的颗粒沉积量会互相干扰[19]。为了避免二次弹跳的问题,目前一般的方法是在收集装置底部铺设其他材料来减少肥料的弹跳,如 GRAFTON 等[20]在收集装置底部放置气泡包;任万军等[21]在纸盒底部铺上细沙;刘彩玲等[22]在纸盒底部放置细土。这种方法不仅增加颗粒肥料的收集难度,而且在日常的收放操作以及运输过程中,带来诸多不便和更高的成本。除此之外,还有部分学者使用柔性垫子替代收集装置来进行沉积分布测试,避免肥料二次弹跳的影响[23],施印炎等[24]在检测区域铺设具有采样网格单元的肥料校准垫,播撒机通过检测区域后颗粒肥料播撒至校准垫上,再统计数量。LIU 等[25]利用人造草坪制作肥料播撒校准垫,由于校准垫表面粗糙能够避免肥料弹跳。这种方法很难对肥料进行收集,一般通过图像识别对肥料进行统计,而颗粒肥料粒径过小、光线不足和颗粒抱团重叠等因素均会影响图像识别的准确率[26],且对场地要求较高。

目前,已有学者尝试利用柔性材料制作收集装置[27-28],这为无人飞机播撒沉积分布测试中收集装置的优化设计提供了新思路。包瑞峰[29]研制了一种肥料颗粒沉积性能检测装置,该装置采用弧形结构的柔性材料收集,相较于普通收集器对黑尿素的沉积增量为 2.03 倍,但弧形结构不利于颗粒物料汇集,测试中人工收集的劳动强度仍较高。王秉玺

等[30]研制了一种航空播撒肥料颗粒分布模式现场检测装置，用于辅助人工收集并测量装置中的种子、肥料等颗粒的质量，但其制作工艺复杂，耗材多。

综上所述，用于无人飞机播撒物料沉积分布测试的收集装置需要避免播撒物料弹跳逃逸的影响，来保证测试的准确性。为了提高无人飞机播撒沉积分布测试中颗粒肥料的收集率，拟对颗粒肥料收集装置的材质及结构等参数进行优选试验，并通过台架试验和田间试验优选出能显著降低颗粒弹跳逃逸的收集装置材质和结构，以提高无人飞机播撒颗粒肥料沉积分布中颗粒肥料收集的准确性。

1　不同柔性材质时颗粒肥料弹跳和收集率对比试验

1.1　试验材料与方法

1.1.1　柔性材料的选择

在设计应用于无人飞机播撒沉积分布测试的收集装置时，选择合适的柔性材料作为承接装置是核心要素。市面常见的柔性材料包括聚氯乙烯、橡胶、泡沫垫（主要材质为乙烯-醋酸乙烯聚合物）和牛津布等（如图 1 所示）。通过测试这些材料对肥料的回弹高度，筛选出适合用于收集装置制作的柔性材料。理论上，肥料的回弹高度越低，表明该柔性材料的弹性越小，意味着该柔性材料更适合用于制作收集装置。

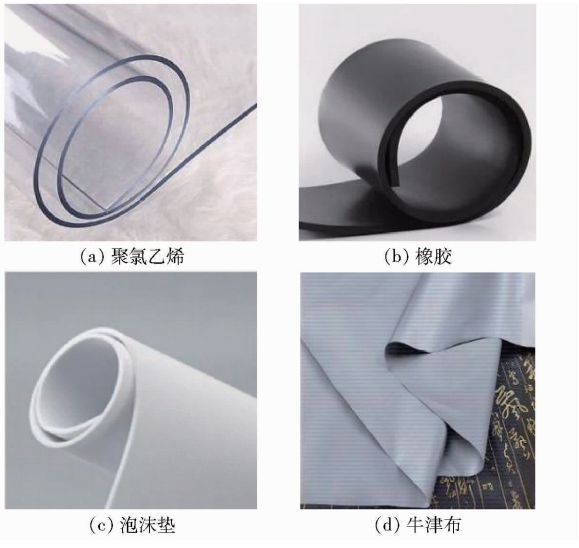


图 1　柔性材料

Fig. 1　Flexible materials

1.1.2　试验材料及所用颗粒肥料

在试验中使用的辅助工具主要有可移动梯子、补光灯、水平仪、悬空台架、网格纸、图钉和卷尺等。主要设备包括铝型材（用于固定槽轮排肥器）、一次性试管（用于盛装肥料）和镊子（用于夹取肥料）。此外，本试验还使用了小米 13 手机拍摄视频、高度可调节的升降台（济南欧耐德机械有限公司）、槽轮排肥器释放肥料。试验所用颗粒肥料为心连心尿素（平均粒径 1.9 mm）和复合肥（平均粒径 2.9 mm），形状如图 2 所示。

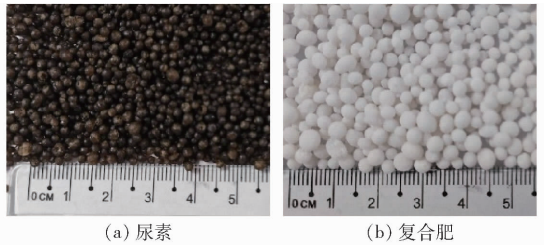


图 2　测试颗粒肥料图

Fig. 2　Diagrams of granulated fertilizer testing

1.1.3　数据获取方法

（1）弹跳高度数据采集

弹跳高度试验台架的布置如图 3 所示。手机正常录像功能难以满足要求，因此手机录像的参数设置为分辨率 1 920 像素 ×1 080 像素、480 f/s 的慢动作录像，试验相对高度设为 2 m，利用槽轮排肥器释放肥料，槽轮排肥器电机转速为 30 r/min，肥料以单颗粒形式逐粒释放，对肥料落下的过程和回弹过程进行慢动作拍摄。每种肥料进行 10 次重复试验。

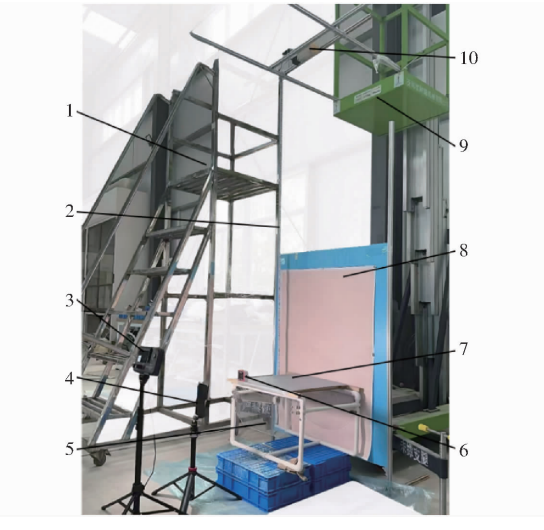


图 3　试验台架布置示意图

Fig. 3　Schematic of test bench layout

1. 可移动梯子　2. 卷尺　3. 补光灯　4. 手机　5. 悬空支架　6. 水平仪　7. 待测柔性材料　8. 网格纸　9. 升降台　10. 槽轮排肥器

利用 Matlab 软件编制相关程序，对试验的视频进行分析处理，以获取颗粒肥料的弹跳高度。在读取过程中，将视频的每一帧都单独保存为图像文件，以便后续进行分析处理。针对保存的每一帧图像，运用图像处理算法进行处理，旨在检测并记录颗粒肥料在图像中的具体位置信息。

（2）收集率计算方法

为进一步验证柔性材料制作收集装置的可行

性,将上述 4 种柔性材料制作成简易收集装置,测试其收集率。先将硬纸盒(500 mm×500 mm×95 mm)底部剪去,再将 4 种柔性材料粘连上去使底部密封,防止肥料泄漏。对照组选择常规的硬纸盒和塑料(聚乙烯)。简易收集装置如图 4 所示。

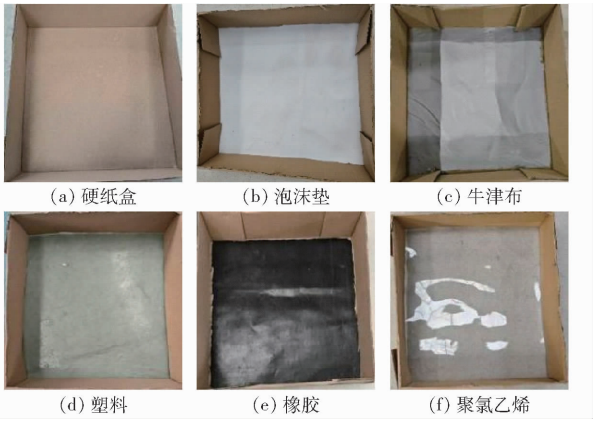


图 4 简易收集装置

Fig. 4 Simple collection device

试验台架使用图 3 的升降台,底部放置悬空支架,用于固定待测的收集装置,槽轮排肥器与盒子中心点位置平齐,试验相对高度为 2 m。随机选取 50 g 肥料,测试时先启动槽轮排肥器电机,再将肥料倒入槽轮排肥器中,低速转动下测试的颗粒肥料接近自由落体运动,确保第一落点落入放置在正下方的收集装置中,最后将沉积在收集装置中的颗粒肥料进行收集,使用精度 0.01 g 电子秤(军胜辉益公司)进行称量,再计算对应的收集率。每种材料、肥料测试均重复 3 次。

由于每次试验投放的肥料量是固定的,所以肥料收集率计算公式为

$$C = \frac{L_1}{L_2} \times 100\% \tag{1}$$

式中 C——收集率,%

L_1——收集的颗粒肥料质量,g

L_2——槽轮排肥器中放置的颗粒肥料质量,g

1.2 试验结果分析

(1)颗粒肥料弹跳高度

弹跳高度具体数据如表 1 所示,从表 1 可以看出,其对应的弹跳高度呈现出一定的顺序关系,由低到高依次为:牛津布、橡胶、泡沫垫、聚氯乙烯。

试验结果表明牛津布对两种肥料的弹跳高度最低,其中对尿素平均弹跳高度为 2.12 cm,对复合肥的弹跳高度为 2.27 cm。对试验数据进行单因素 ANOVA 检验,在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下,牛津布对尿素和复合肥的弹跳高度与其他 3 种柔性材料显著性均有差异,可以得出牛津布对尿素和复合肥的回弹高度显著低于其他 3 种柔性材料,更适合用于无人飞机播撒沉积分布测试。

表 1 不同柔性材料的颗粒肥料弹跳高度

Tab. 1 Bouncing height of granular fertilizer on different flexible materials cm

肥料类型	柔性材料类型	重复次数	平均值	标准差	最小值	最大值
尿素	牛津布	10	2.12	0.19	1.80	2.40
	泡沫垫	10	3.85	0.38	3.40	4.50
	聚氯乙烯	10	13.56	0.52	12.80	14.20
	橡胶	10	2.79	0.25	2.50	3.20
复合肥	牛津布	10	2.27	0.25	1.90	2.70
	泡沫垫	10	4.54	0.39	4.10	5.10
	聚氯乙烯	10	14.92	0.54	14.20	15.80
	橡胶	10	2.88	0.27	2.50	3.30

(2)颗粒肥料收集率

试验数据如表 2 所示,4 种柔性材料对尿素的收集率相比纸盒增加范围为 46.33% ~59.53%;相比塑料增加范围为 17.5% ~30.7%,收集率从大到小为:牛津布、橡胶、泡沫垫、聚氯乙烯。4 种柔性材料对复合肥的收集率相比纸盒增加范围为 69.46% ~72.42%,相比塑料对复合肥的收集率增加范围为 23.36% ~26.32%,收集率从大到小为:牛津布、橡胶、聚氯乙烯、泡沫垫。

表 2 不同柔性材料的颗粒肥料收集率

Tab. 2 Collection rate of granular fertilizer on different flexible materials

肥料类型	材料类型	各采样点质量/g			质量均值/g	标准差/g	收集率/%
		1	2	3			
尿素	塑料	32.21	33.41	33.72	33.11	0.651	66.23
	纸盒	18.16	20.22	17.72	18.70	1.090	37.40
	牛津布	48.12	48.24	49.03	48.46	0.404	96.93
	泡沫垫	46.01	46.65	45.59	46.08	0.436	92.17
	聚氯乙烯	42.01	42.21	41.38	41.87	0.354	83.73
	橡胶	47.21	46.89	47.33	47.14	0.186	94.29
复合肥	塑料	36.34	36.21	37.09	36.55	0.388	73.09
	纸盒	15.00	12.60	12.89	13.50	1.070	26.99
	牛津布	49.87	49.57	49.68	49.71	0.124	99.41
	泡沫垫	48.12	48.54	48.01	48.22	0.228	96.45
	聚氯乙烯	48.47	48.97	48.39	48.61	0.257	97.22
	橡胶	49.01	48.59	48.88	48.83	0.176	97.65

试验结果表明,4 种柔性材料的简易收集装置对尿素和复合肥的收集率相比对照组的纸盒和塑料均有较大程度的提升,其中牛津布对尿素和复合肥的收集率都是最高的,尿素收集率为 96.93%,复合肥收集率为 99.41%。使用合适的柔性材料作为收集装置的主要材料可提高颗粒肥料的收集率,因此后续使用牛津布作为收集装置的主要材料。

2　不同结构收集装置时颗粒肥料收集率对比试验

2.1　不同结构收集装置设计

目前国际上开展颗粒肥料沉积分布测试的方法主要有 6 种标准(如图 5 所示),分别为国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)标准Ⅰ和Ⅱ、美国农业工程师学会(American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE)标准、欧盟标准(European Standard, ES)、澳大利亚标准(ACCU - Spread)和新西兰标准(Spreadmark)[31]。上述 6 种标准对收集装置的布置位置和间隔均不同,其中除了 ISO Ⅱ使用收集装置开口尺寸为 2 500 mm × 1 000 mm,其他 5 种标准的收集装置开口尺寸均为 500 mm × 500 mm。JONES 等[32]对现有 6 种国际上常用的播撒测试收集量分布测试方法进行了实际的现场对比试验,得到使用澳大利亚标准(ACCU - Spread)测量得出的工作幅宽与播撒机出厂校准的作业幅宽最为接近,并且数据更为精准。因此收集装置的开口尺寸设置为 500 mm × 500 mm。根据第 1 节试验结果,使用牛津布作为制作收集装置的主要材料。

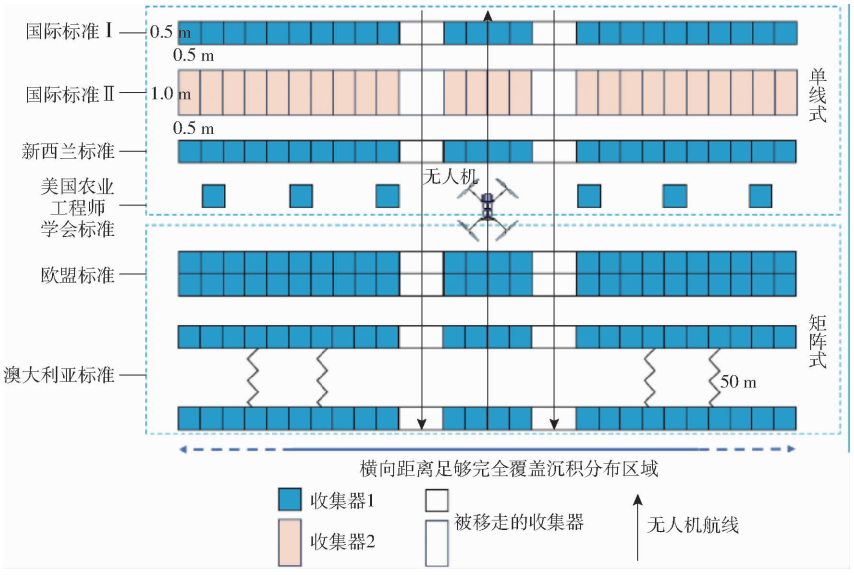


图 5　国际上常见的 6 种颗粒肥料沉积分布测试标准的收集装置布置示意图

Fig. 5　Collection device layouts for six international sedimentation test standards of granular fertilizers

使用牛津布分别设计并制作了如图 6 所示的锥形收集装置(形状为倒正四棱锥型,入口尺寸为 500 mm × 500 mm,高度为 500 mm)和如图 7 所示的弧形收集装置(入口尺寸为 500 mm × 500 mm,弧度为 2.23 rad)两种收集装置。锥形收集装置物料出口设置在底部,弧形收集装置的物料出口则设置在侧面,二者物料出口均可与试管连接,便于肥料收集,同时能够防止肥料长期暴露在空气中受潮。

2.2　试验材料和方法

为验证这两种形状的收集装置收集效果,通过台架试验对两种收集装置进行收集率对比试验,并加入常用的硬质塑料箱(主要材质为聚乙烯,其内尺寸为 500 mm × 500 mm × 270 mm)作为对照组,3 种收集装置如图 8 所示。试验所使用的其他材料包括:铝型材、一次性试管、手套、口罩、测试肥料(复合肥和尿素)、槽轮排肥器、升降台、电子秤。

试验台架以图 3 所示的升降台为基础,模拟实际播撒作业的高度,本次试验高度为 4 m。具体试验步骤如下:选取 10 g 颗粒肥料装入试管中保持干燥状态;将收集装置固定在槽轮排肥器正下方同一位置,并确保肥料第一落点位于收集范围内;随后调整槽轮排肥器与收集装置入口表面相对高度至 4 m;启动槽轮排肥器电机释放肥料;完成排出后立即收集装置中的肥料并进行称量计数记录。

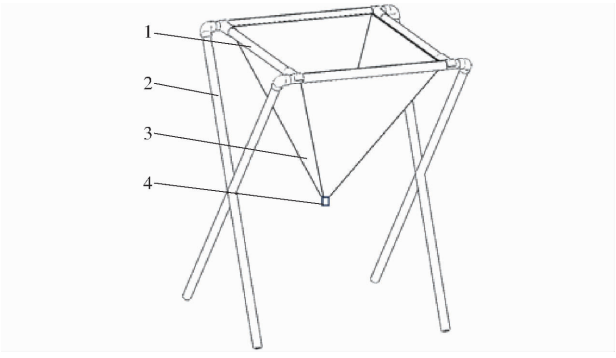


图 6　锥形收集装置结构示意图

Fig. 6　Structure diagram of cone collector

1. 支撑杆　2. 支撑架　3. 牛津布　4. 肥料出口

为保证试验准确性,对不同肥料和不同收集装置重复上述操作 10 次。得到锥形收集装置和弧形

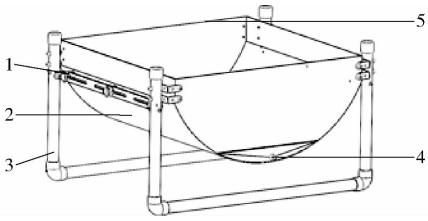
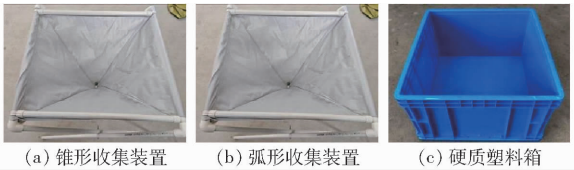


图 7 弧形收集装置结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of arc collector

1. 支撑杆 2. 牛津布 3. 支撑架 4. 挡板 5. 肥料出口

收集装置对复合肥和尿素的收集量,并根据式(1)计算收集率。



(a) 锥形收集装置 (b) 弧形收集装置 (c) 硬质塑料箱

图 8 3 种收集装置实物图

Fig. 8 Three types of collection devices real images

2.3 试验结果与分析

3 个收集装置的收集率如表 3 所示。从表中可以看出硬质塑料箱对尿素、复合肥的收集率均为最低,分别只有 50.81% 与 55.57%。弧形收集装置对尿素和复合肥的收集率高于硬质塑料箱,其中尿素的收集率比硬质塑料箱增加了 43.68 个百分点,复合肥的收集率比硬质塑料箱增加了 40.12 个百分点。锥形收集装置对尿素和复合肥的平均收集率均最高,其中尿素的收集率比硬质塑料箱增加了 45.76 个百分点,复合肥的收集率比硬质塑料箱增加了 42.68 个百分点。

对试验数据进行单因素 ANOVA 检验,检验结果表明,在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下,采用柔性材料制作的锥形收集装置和弧形收集装置对尿素和复合肥的收集率相比传统的硬质塑料箱差异性显著,表明柔性材料的收集装置收集效果相比硬质塑料箱提升显著。综上所述,对比硬质塑料箱,弧形收集装置和锥形收集装置对尿素和复合肥的收集率都有显著提升。锥形收集装置相比弧形收集装置对尿素和复合肥收集量差异性不显著,但锥形收集装置对尿素和复合肥的收集率比弧形收集装置有所提高。

表 3 3 种收集装置收集率台架试验结果

Tab. 3 Comparison of collection rate of three kinds of collectors by bench test

肥料类型	收集装置类型	重复次数	平均值/g	标准差/g	平均值的 95% 置信区间/g		最小值/g	最大值/g	收集率/%
					下限	上限			
尿素	硬质塑料箱	10	5.081 0	0.744 81	4.548 2	5.613 8	4.22	6.20	50.81
	弧形收集装置	10	9.449 0	0.159 13	9.335 2	9.562 8	9.12	9.64	94.49
	锥形收集装置	10	9.657 0	0.107 61	9.580 0	9.734 0	9.52	9.81	96.57
复合肥	硬质塑料箱	10	5.557 0	0.566 02	5.152 1	5.961 9	4.69	6.43	55.57
	弧形收集装置	10	9.569 0	0.097 23	9.499 4	9.638 6	9.45	9.71	95.69
	锥形收集装置	10	9.825 0	0.067 04	9.777 0	9.873 0	9.72	9.92	98.25

此外,从表 3 中 3 种收集装置对尿素和复合肥收集率标准差可以得出,锥形收集装置的标准差最低,其次是弧形收集装置,硬质塑料箱的标准差最大。上述结果说明锥形收集装置稳定性最好,其次是弧形收集装置,而硬质塑料箱效果最差。在播撒肥料颗粒沉积分布测试需要大量的收集装置,因而采取柔性材料制作锥形收集装置能够提高测试的准确性。

3 无人飞机播撒作业的颗粒肥料沉积分布特性田间试验

3.1 田间试验方法

3.1.1 收集装置及布置方案

为了进一步验证锥形收集装置的收集效果,于 2025 年 1 月 22 日在广东省广州市增城区宁西镇华南农业大学教学科研基地开展田间试验。试验区域内设置 9 条收集带,其中锥形收集装置、弧形收集装置、硬质收集箱各 3 条,每条收集带之间的距离为 2 m,并且按照顺序摆放,每条收集带两个收集装置之间中心间隔 1 m,每条收集带放置的收集装置数量均为 16 个,每种收集装置摆放的数量均为 48 个。收集装置具体布置如图 9 所示。

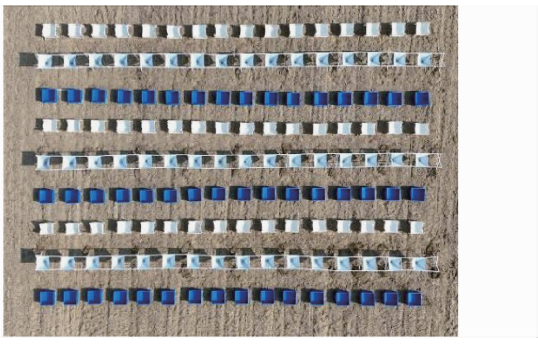


图 9 收集装置布置图

Fig. 9 Collection device layout diagram

3.1.2 航线方案

同样选用尿素和复合肥作为测试肥料,其主要物理特性见 1.1 节。两种肥料的播撒作业用量设置

3 个水平，分别为 75、150、225 kg/hm^2。试验所用机型为大疆 T70 无人飞机（大疆创新）搭载离心圆盘播撒器。测试航线为多航线播撒测试，无人飞机起飞点和换行点距离采集带 20 m，用于无人飞机加速和减速，确保无人飞机在收集区域内处于匀速飞行作业状态。依据实际作业方式，航线设置为 3 条，无人飞机在 RTK 定位模式下，依照“几”字形航线往复飞行，保证落料能够覆盖所有收集装置。具体航线方案如图 10 所示，无人飞机的作业参数依据大疆官方推荐参数，具体作业参数如表 4 所示。

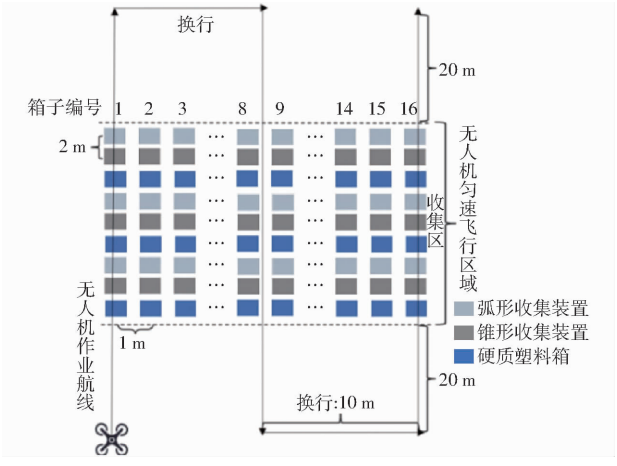


图 10　无人飞机飞行航线示意图

Fig. 10　Structure diagram of UAV flight path

表 4　试验作业参数

Tab. 4　Test operation parameters

作业参数	数值
离心转盘转速/(r·min^{-1})	1 100
飞行速度/(m·s^{-1})	7
飞行高度/m	6
作业幅宽/m	10

3.1.3　评价指标

由于实际播撒作业中，每个收集装置实际投放肥料质量并不固定且无法确定具体质量，无法计算各个收集装置的具体收集率，因此本次试验以肥料的收集量为指标。每次作业任务完成后，立即对收集装置中的所有肥料进行收集，并使用精度为 0.01 g 的电子秤称量，称量得出的质量就是该收集装置对应的收集量。计算出锥形收集装置和弧形收集装置相对硬质收集箱的收集增量，以此评估不同收集装置的收集效果。

3.2　试验结果与分析

田间试验尿素收集量如图 11a 所示（A 为锥形收集装置；B 为硬质塑料箱；C 为弧形收集装置；1 为肥料用量 75 kg/hm^2；2 为肥料用量 150 kg/hm^2；3 为肥料用量 225 kg/hm^2），复合肥收集量如图 11b 所示，通过条形图可得，在同样的用量水平下，锥形收集装置对尿素和复合肥的收集量均最多，其次是弧形收集装置，硬质塑料箱的收集效果均最差。

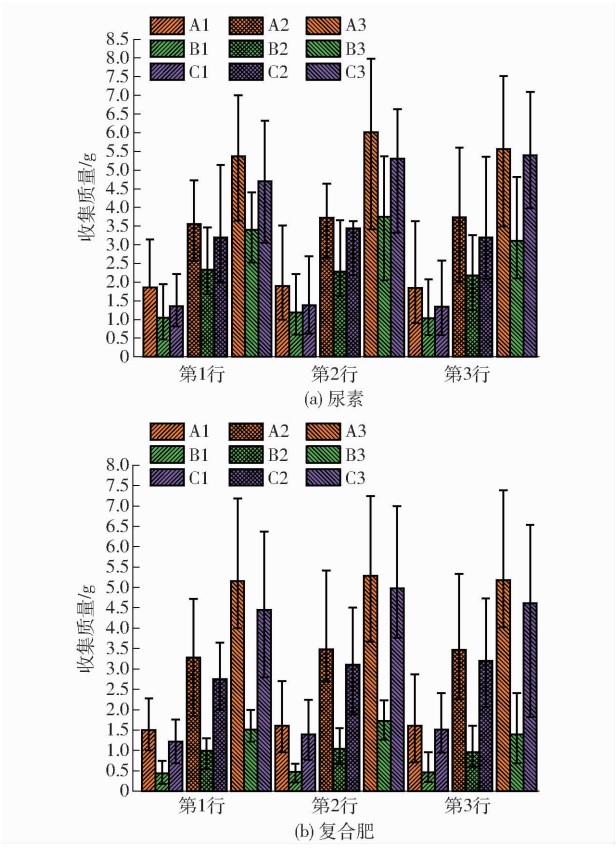


图 11　肥料收集量

Fig. 11　Quantity of fertilizer collected

进一步计算锥形收集装置和弧形收集装置相对硬质收集箱的收集增量，计算结果如表 5 所示。根据表 5 可以得出尿素的收集量在用量 75、150、225 kg/hm^{2}的水平下，锥形收集装置对硬质塑料箱分别增加 0.75、1.41、2.23 g；弧形收集装置比硬质塑料箱分别增加 0.27、1.02、1.71 g。对复合肥在用量 75、150、225 kg/hm^{2}的水平下，锥形收集装置的收集量比硬质塑料箱分别增加 1.13、2.37、3.67 g；弧形收集装置比硬质塑料箱收集量分别增加 0.92、2.01、3.14 g。

表 5　田间试验颗粒肥料收集量

Tab. 5　Amount of granular fertilizer collection in field test

肥料类型	排量/(kg·hm^{-2})	平均收集量/g			收集增量/g	
		硬质塑料箱	锥形收集装置	弧形收集装置	锥形收集装置	弧形收集装置
尿素	75	1.09	1.84	1.36	0.75	0.27
尿素	150	2.26	3.67	3.28	1.41	1.02
尿素	225	3.42	5.65	5.13	2.23	1.71
复合肥	75	0.45	1.57	1.37	1.13	0.92
复合肥	150	1.00	3.37	3.01	2.37	2.01
复合肥	225	1.54	5.21	4.68	3.67	3.14

对田间试验数据进行单因素 ANOVA 检验,验证结果表明,在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,锥形收集装置、弧形收集装置和硬质塑料箱对尿素和复合肥的收集量对比,差异性均显著。说明两种使用柔性材料制作的收集装置收集效果显著优于对照组的硬质收集箱。且田间试验中,锥形收集装置和弧形收集装置的收集效果也有显著性差异,原因可能是弧形收集装置更容易受到无人飞机风场或者室外环境的影响。因此,从试验可以得出锥型收集装置的收集效果最好,更适用于针对无人飞机播撒沉积分布测试的颗粒物料收集。

从试验结果分析可得,无人飞机播撒颗粒肥料存在二次弹跳现象,因而面对无人飞机播撒颗粒肥料沉积分布测试需要考虑肥料的弹跳逃逸造成的误差,使用柔性材料制作的收集装置,能够很好避免肥料的弹跳逃逸现象,提高肥料的收集率,保证测试数据的准确性。

4 结论

(1)为了提高农用无人飞机播撒颗粒肥料沉积分布测试的效率与准确性,参照国际标准,设计了一种基于柔性材料的收集装置,通过台架试验和田间试验对比传统收集装置的收集效果,验证该装置的可用性与可靠性。

(2)柔性材料对两种肥料的弹跳高度由低到高依次为:牛津布、橡胶、泡沫垫、聚氯乙烯,其中牛津布的弹跳高度最低,对尿素平均弹跳高度为 2.12 cm,对复合肥的平均弹跳高度为 2.27 cm。柔性材料对尿素和复合肥的收集率相比对照组纸盒和塑料均有较大程度的提升。4 种柔性材料中,牛津布对尿素和复合肥的收集率都是最高,其中尿素的收集率为 96.93%,复合肥的收集率为 99.41%,适合用来制作针对无人飞机播撒沉积分布测试的收集装置。

(3)在室内台架测试中,锥形收集装置对尿素和复合肥的收集率分别为 96.57% 和 98.25%,相比对照组硬质塑料箱分别增加了 45.76、42.68 个百分点,锥形收集装置对尿素和复合肥的收集效果最好,且其收集稳定性最好。弧形收集装置虽然收集效果不如锥形收集装置,但其对尿素和复合肥的收集率也分别达 94.49% 和 95.69%,相比硬质塑料箱也有显著提升,稳定性较好。硬质塑料箱对这些物料的收集效果最差,收集率低于由柔性材料制作的锥形收集装置和弧形收集装置。结果表明柔性材料对播撒肥料的收集效果相比硬质塑料箱提升显著,且收集的稳定性更好。

(4)锥形收集装置对尿素的收集量在用量 75、150、225 kg/hm^2 的水平下,比硬质塑料箱分别增加 0.75、1.41、2.23 g;对复合肥的收集量相比硬质塑料箱分别增加 1.13、2.37、3.67 g。弧形收集装置对尿素的收集量在此用量同样的水平下,比硬质塑料箱分别增加 0.27、1.02、1.71 g;对复合肥的收集量,相比硬质塑料箱分别增加 0.92、2.01、3.14 g。试验结果表明,柔性材料制作的收集装置能够显著增加肥料的收集量,可避免无人飞机播撒颗粒肥料的弹跳逃逸现象。

参 考 文 献

[1] 周志艳,明锐,臧禹,等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 1 – 13.
ZHOU Zhiyan, MING Rui, ZANG Yu, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 1 – 13. (in Chinese)

[2] 宋灿灿,王国宾,韩金钢,等. 农用无人机播撒装置与技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 110 – 122.
SONG Cancan, WANG Guobin, HAN Jingang, et al. Review of research progress on agricultural UAV spreading devices and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 110 – 122. (in Chinese)

[3] SONG C, ZHOU Z, ZANG Y, et al. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105832.

[4] FULTON J P, SHEARER S A, HIGGINS S F, et al. Distribution pattern variability of granular VRT applicators[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2005, 48(6): 2053 – 2064.

[5] VILLETTE S, PIRON E, MICLET D. Hybrid centrifugal spreading model to study the fertiliser spatial distribution and its assessment using the transverse coefficient of variation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 137: 115 – 129.

[6] HEIB A, PARAFOROS D S, SHARIPOV G M, et al. Real-time control for multi-parametric data fusion and dynamic offset optimization in sensor-based variable rate nitrogen application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106893.

[7] CROZIER C, ROBERSON G. Granular fertilizer spreader swath uniformity achieved at varying target application rates[J]. Crop Management, 2014, 13(1): 1 – 6.

[8] WANG X, ZHOU Z, CHEN B. Distribution uniformity improvement methods of a large discharge rate disc spreader for UAV fertilizer application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108928.

[9] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 308 – 325.

[10] 宋灿灿,周志艳,姜锐,等. 气力式无人机水稻撒播装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 80 – 88.
SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, JIANG Rui, et al. Design and parameter optimization of pneumatic ricesowing device for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 80 – 88. (in Chinese)

[11] 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.
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. (in Chinese)

[12] 宋灿灿,王国宾,赵静,等. 颗粒肥撒施过程中的沉积分布模式研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 59 – 70.
SONG Cancan, WANG Guobin, ZHAO Jing, et al. Research progress on the particle deposition and distribution characteristics of granular fertilizer application[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(14): 59 – 70. (in Chinese)

[13] SHARIPOV G M, HEIB A, ESHKABILOV S L, et al. Variable rate application accuracy of a centrifugal disc spreader using ISO 11783 communication data and granule motion modeling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106006.

[14] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 86 – 93, 113.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 86 – 93, 113. (in Chinese)

[15] 刘莫尘,赵庆吉,韩守强,等. 桑园自走式变比配肥定向撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 120 – 130.
LIU Mochen, ZHAO Qingji, HAN Shouqiang, et al. Development and test of self-walking mulberry garden integrated machine with variable proportion and directional disperse fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 120 – 130. (in Chinese)

[16] THAPER R K, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Potential of fertilizer segregation during application using spinner disc spreader[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(1): 83 – 100.

[17] GRAFTON M, YULE I, MANNING M. A review of practices in precision application of granular fertilisers[C]//7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture, 2017:891516.

[18] 周圆,沈云鹏,段志平,等. 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, et al. Effects of physical properties of fertilizer on the uniformity of UAV fertilization[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(12): 57 – 71. (in Chinese)

[19] SONG C, ZANG Y, ZHOU Z. Test and comprehensive evaluation for the performance of UAV-based fertilizer spreaders[J]. IEEE Access, 2020, 8: 202153 – 202163.

[20] GRAFTON M, IRWIN M, SANDOVAL C E. Measuring the response of variable bulk solid fertiliser application by computer-controlled delivery from aircraft[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2022, 65(6): 507 – 519.

[21] 任万军,吴振元,李蒙良,等. 水稻无人机撒肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 88 – 98.
REN Wanjun, WU Zhenyuan, LI Mengliang, et al. Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 88 – 98. (in Chinese)

[22] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 32 – 39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32 – 39. (in Chinese)

[23] WU Z, LI M, LEI X, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV[J]. Biosystems Engineering, 2020, 192: 275 – 293.

[24] 施印炎,刘慧,汪小旦,等. 颗粒肥料沉积分布模式自动检测系统及方法:202410006883.0[P]. 2024 – 05 – 14.

[25] LIU H, WANG L, SHI Y, et al. A deep learning-based method for detecting granular fertilizer deposition distribution patterns in centrifugal variable-rate spreader fertilization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108107.

[26] HIJAZI B, COINTAULT F, DUBOIS J, et al. Multi-phase cross-correlation method for motion estimation of fertiliser granules during centrifugal spreading[J]. Precision Agriculture, 2010, 11(6): 684 – 702.

[27] 张建瓠,邓继忠,霍静朗,等. 一种航空撒播作业质量的快速检测系统及方法:202010931765.2[P]. 2020 – 12 – 18.

[28] 周志艳,包瑞峰,王勋威,等. 一种颗粒物料沉积性能检测装置及方法:202310392677.3[P]. 2023 – 06 – 30.

[29] 包瑞峰. 颗粒物料撒播沉积量分布测量平台的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
BAO Ruifeng. Design and test of granular material spreading deposition distribution measurement platform[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[30] 王秉玺,罗伍周,朱小波. 一种航空播撒颗粒物分布模式现场检测装置: 201521079850.1[P]. 2016 – 05 – 04.

[31] LAWRENCE H, YULE I, JONES J. A statistical analysis of international test methods used for analysing spreader performance [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2006, 49: 451 – 463.

[32] JONES J R, LAWRENCE H G, YULE I J. A statistical comparison of international fertiliser spreader test methods—confidence in bout width calculations[J]. Powder Technology, 2008, 184(3): 337 – 351.