

植物叶片表面结构对雾滴沉积的影响分析*

王 沛¹ 祁力钧¹ 李 慧¹ 冀荣华¹ 王 虎²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 国家知识产权局专利局审查协作北京中心机械部, 北京 100190)

摘要: 为探索雾滴在不同结构叶片表面沉积效果差异, 试验研究了 138.2、176.5、209.1、235.1 和 283.7 μm 5 个粒径雾滴在毛刺、蜡质和粗糙 3 种表面的沉积效果, 分析了各类叶片表面在与水平面呈 0°、15°、30°、45°、60° 和 75° 6 个夹角时的沉积差异。对叶面结构、叶片倾角和雾滴粒径 3 个因素的影响程度差异进行了正交试验。结果表明, 喷量相同的情况下, 雾滴在蜡质及粗糙叶面沉积率随雾滴粒径增大而减小, 在毛刺叶片表面, 当雾滴粒径大于 231.5 μm 时, 药液沉积率随雾滴粒径增大而减小的趋势更为明显。在毛刺和粗糙叶片表面, 药液沉积率随叶面倾角增大而减小; 而在蜡质叶面, 倾角大于 45° 时, 沉积率会产生一次突增并超过较小倾角时的雾滴沉积率。叶片倾角对雾滴沉积率影响最大, 叶面结构次之, 雾滴粒径影响不显著。

关键词: 叶面结构 叶面倾角 雾滴粒径 沉积率

中图分类号: S493 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0075-05

Influence of Plant Leaf Surface Structures on Droplet Deposition

Wang Pei¹ Qi Lijun¹ Li Hui¹ Ji Ronghua¹ Wang Hu²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Machinery Invention Examination Department, Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to investigate the droplet deposition on hairy, waxy and rough plant leaves, a series of experiments were schemed with a combination of five droplet sizes of 138.2 μm , 176.5 μm , 209.1 μm , 235.1 μm and 283.7 μm and six leaf dip angles of 0°, 15°, 30°, 45°, 60° and 75°. The orthogonal tests were used to analyze the cross influences among plant leaf surface structures, leaf surface dips and droplet sizes. The experiment results showed, under same spray volume, droplet deposition tended to decline with the increase of the droplet sizes in general. On the hairy structure leaf surface, a turning point turn up after which the deposition decrease was getting larger sharply when the droplet size was over 231.5 μm . On hairy and rough surfaces, droplet deposition increased with the surface dip's reducing. However, on the waxy leaf surfaces, a positive deposition mutation might take place as the surface dip exceeded 45°. The study concluted that leaf dips had more influence on droplet deposition than leaf surface structures while the droplet size made little effect on it.

Key words: Leaf surface structures Leaf surface dips Droplet sizes Deposition

引言

化学植保是现代农业生产中的重要环节之一^[1]。喷雾雾滴的有效沉积率直接决定了化学农

药的有效利用率^[2]。在已有的农药沉积率影响研究方面, 朱金文等研究了不同粒径雾滴与施药量情况下草甘膦在空心莲子草叶片的沉积差异, 发现小粒径雾滴和低施药量下, 草甘膦在靶标上沉积率大

收稿日期: 2012-09-03 修回日期: 2012-10-10

* 农业部行业科技专项基金资助项目(201203025)和中国农业大学研究生创业专项基金资助项目(2012YJ262)

作者简介: 王沛, 博士生, 主要从事植保机械与施药技术研究, E-mail: wangpei@live.cn

通讯作者: 祁力钧, 教授, 博士生导师, 主要从事植保机械与施药技术研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

幅提高^[3]。Wise 等比较了不同型号喷头和喷雾用水量情况下葡萄园虫害防治效果的差异,发现不同喷头和用水量对雾滴在靶标正反面沉积效果影响显著^[4]。吕晓兰等试验了不同喷雾参数下雾滴沉积的分布情况,认为喷雾高度、移动速度、风送速度和喷雾压力对雾滴沉积率的影响依次变弱^[5]。Maski 等研究了静电喷头在不同充电电压、移动速度和靶标高度下雾滴在亲水和憎水两种结构叶片表面的沉积差异^[6]。

与此同时,由于不同植物叶片表面结构特性各异,雾滴在毛刺、蜡质、粗糙程度不同的植物叶片表面附着沉积情况也有明显差异^[7-10]。对于雾滴在不同结构叶片表面沉积规律变化方面暂时尚无系统的研究结果。本文通过测定不同粒径雾滴在不同喷雾角度下于毛刺、蜡质和粗糙 3 种结构叶片表面的沉积率,分析各因素对雾滴沉积率的影响规律,并利用正交试验方差分析,研究叶面结构、叶片倾角和雾滴粒径 3 个因素间影响差异,为化学施药提供科学的理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验植物叶片

试验植物叶片为:地黄,叶片表面为毛刺;早开堇菜,叶片表面为蜡质层;毒麦,叶片表面呈条纹状。以上植物均选择并采集自中国农业大学西校区教学实验中心试验田常见杂草。试验时,清洗植物叶片表面并放置一段时间使表面水滴完全蒸发。再切取 1 cm×2 cm 表面洁净的供试叶片,特征面朝上放置于试验支架上指定位置。

1.2 试验试剂

亚甲基蓝(天津市金科化工研究所,99.99%)和水。

1.3 试验仪器和软件

1.0 mL 移液管,10.0、50.0 和 100.0 mL 容量瓶,722 型分光光度计,比色皿,洗瓶,燕龙 YL45-B 型高压动力喷雾机,天车,角度可调载物台,MSS 激光粒度仪(Malvern Instruments Co., Ltd.),计算机,Matlab R2010b 科学计算软件。

1.4 雾滴粒径测量结果

选用型号为 F-110-015、F-110-03 和 F-110-06 的 3 种喷头,150、300 和 500 kPa 3 个喷雾压力。组合喷头型号、喷雾压力喷雾,利用激光粒度仪,测定各喷头在不同喷雾压力下相应雾滴粒径,如表 1 所示。

为保证试验结果具有可参考性,需采用粒径差较明显且差值相近的 3 个粒径的雾滴进行试验。采

用 138.2、176.5、209.1、235.1 和 283.7 μm 5 个粒径雾滴,即 F-110-015(500 kPa)、F-110-03(150 kPa)、F-110-06(150 kPa)3 个喷头压力组合进入后续试验。

表 1 不同喷头型号和喷雾压力下的雾滴粒径
Tab.1 Relates for sprayer, pressure and droplet size

喷头型号	喷雾压力/kPa		
	150	300	500
F-110-015	176.5	154.7	138.2
F-110-03	209.1	182.1	157.6
F-110-06	283.7	235.1	217.4

1.5 试验处理

试验中,利用 YL45-B 型高压喷雾机,使用单个喷头作业。将喷杆固定于天车,喷雾高度 65 cm,行走速度 2 m/s,垂直向下喷雾,药液体积分数为 0.1%,喷量 0.5 L/min。选择毛刺、蜡质和粗糙 3 种结构叶面作为靶标,叶片倾角为 0°、15°、30°、45°、60°和 75°,雾滴粒径为 138.2、176.5、209.1、235.1 和 283.7 μm,如图 1 所示。

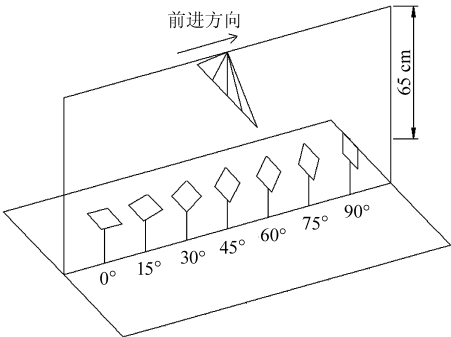


图 1 喷雾试验作业示意图

Fig.1 Diagram of spraying experiment

同时,为分析各因素影响差异,以叶面结构、叶片倾角、雾滴粒径为因素,选择 3 个粒径,改变叶面角度并更换不同结构叶片作为喷雾靶标,进行沉积试验。设计 L₉(3⁴)正交试验,试验因素列于表 2,每组试验重复 3 次,测定药液沉积量,求平均值。

表 2 L₉(3⁴)正交试验
Tab.2 L₉(3⁴) orthogonal experiment

水 平	因素			
	叶面结构 a	叶面倾角 b/(°)	雾滴粒径 c/μm	误差列 d
1	毛刺	0	138.2	1
2	蜡质	30	209.1	2
3	粗糙	60	283.7	3

1.6 雾滴沉积率的测定方法

配制体积分数为 0.05%、0.01%、0.005%、0.001%和 0.000 5% 的系列亚甲基蓝溶液,分别测

定其在波长 624 nm 下吸光度。绘制亚甲基蓝体积分数-吸光度标准曲线,并求回归方程。试验处理后,待叶片上沉积的雾滴蒸发完全后,用 100 mL 清水分 3 次洗脱,测定洗脱液透光率 T 3 次,求均值,并计算溶液吸光度 A_{624} 。将测得吸光度代入标准曲线方程,求得洗脱液亚甲基蓝体积分数 ε_μ 及叶面亚甲基蓝沉积率,计算公式为

$$A_{624} = -\lg T = p\varepsilon_\mu \tag{1}$$

$$\varepsilon_\mu = A_{624}/p \tag{2}$$

$$Q = \frac{\varepsilon_\mu V}{S} \tag{3}$$

式中 A_{624} ——波长 624 nm 处吸光度
 p ——回归系数
 V ——洗脱液体积, μL
 S ——叶片面积, cm^2

记录标准溶液透光率,并计算相应吸光度,如表 3 所示。

表 3 标准溶液吸光度

Tab.3 Absorbance of standard solutions

$\varepsilon_\mu/\%$	$T/\%$	A_{624}
0	100	0
0.000 5	94.0	0.026 9
0.001 0	81.3	0.089 9
0.005 0	35.4	0.451 0
0.010 0	15.5	0.810 0
0.050 0	0.01	4.000 0

绘制亚甲基蓝百分含量-吸光度标准曲线,如图 2 所示。

运用最小二乘法求得标准曲线回归方程为

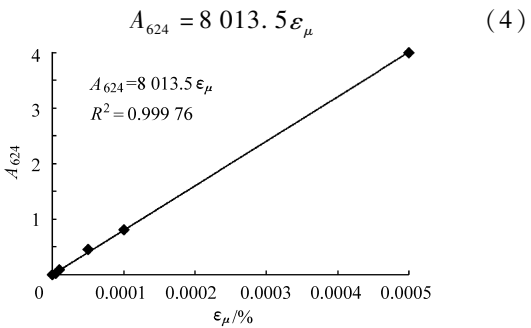


图 2 亚甲基蓝体积分数 ε_μ -吸光度 A_{624} 标准曲线
Fig.2 Standard curve of methylene blue (ε_μ) and absorbance (A_{624})

2 结果与分析

2.1 雾滴在叶面沉积的影响因素

不同叶片结构下沉积率和雾滴粒径关系曲线如图 3 所示。

在粗糙和蜡质叶片表面,当叶片与水平面夹角较小,即雾滴沉积角度较小时,雾滴沉积率随着粒径增大而减小的趋势较为平缓(图 3a、3b)。在喷量相同的情况下,当雾滴粒径增大时,单位面积上的雾滴密度有所下降。同时,有研究表明,大粒径雾滴撞击叶面时,由于动量较大,产生反弹作用更为明显;另一方面大粒径雾滴在叶面积累,加快了药液的流失^[11],从而降低了雾滴在叶面的沉积效果。当叶片与水平面夹角较大,大粒径雾滴沉积效果相对有所回升(图 3c)。这是因为倾斜的叶面会增大雾滴与叶面的接触面积,并且通过摩擦释放部分动能,使雾滴的反弹趋于减弱,因此减缓了沉积率随雾滴粒径增大而减小的趋势。

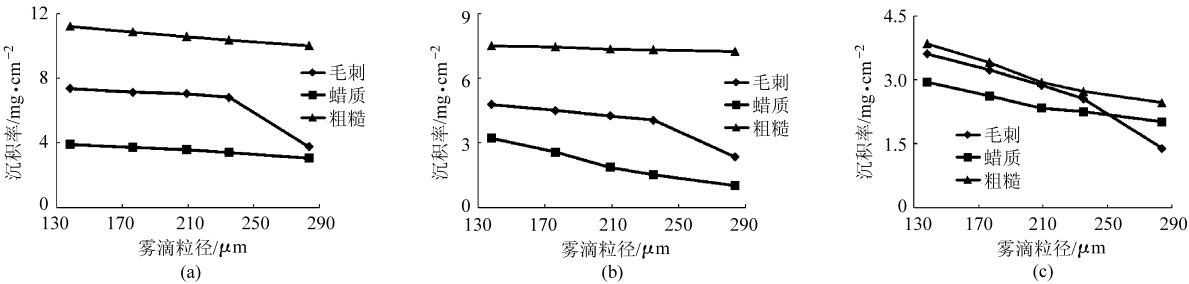


图 3 不同叶面结构下沉积率和雾滴粒径关系曲线

Fig.3 Curves for deposition and droplet sizes under different surface structures
(a) 0° (b) 30° (c) 60°

从图 3 可以看出,在毛刺叶片表面,雾滴沉积率随着粒径的增大而减小,大粒径雾滴的沉积率要大幅小于中、小粒径雾滴的沉积率,此种情况在图 3a、图 3c 中表现得尤为明显,粒径为 235.1 μm 的雾滴在毛刺叶面的沉积率已经接近甚至低于在蜡质叶面的沉积率,而正如之前所分析的,蜡质叶面在倾角较小时最不利于雾滴沉积。这是由于雾滴粒径较大

时,毛刺叶片表面的针状组织不利于支撑或吸附大粒径雾滴,雾滴因不能接触叶片表面润湿而掉落,造成了雾滴在此类结构表面沉积率的下降。

如上所述,在不同叶面倾角下,各结构叶片表面,雾滴沉积率随粒径的变化规律是存在差异的。总体而言,雾滴在毛刺和粗糙叶片表面的沉积效果要优于蜡质表面。这是由于蜡质叶面不利于水溶液

的附着,雾滴在蜡质叶片表面不易铺展润湿,并且容易产生反弹、滚落等不利于雾滴沉积的作用效果。

不同粒径下沉积率和叶面倾角关系曲线如图 4 所示。当雾滴在相同结构不同倾角叶片表面沉积时,叶片倾角为 0°的表面沉积率最大,此时雾滴沉积到叶片表面反弹后更易掉落在叶面范围之内,雾滴滚落的情况亦不易发生,因而 0°是最不利于雾滴损失的叶面倾角,雾滴在不同结构表面都能顺利铺展。在毛刺和粗糙叶片表面,雾滴沉积率随叶片倾角的增大而减小,这主要是药液滚落损失造成的。随着叶片倾角的增大,雾滴滚落的趋势随之增强,从而造成了沉积率的降低(图 4a、图 4c)。蜡质叶片表

面具有与毛刺、粗糙表面相反的沉积效果(图 4b)。中、小粒径雾滴在各倾角叶面沉积率差异并不大,但当雾滴粒径变大,倾角大于 45°时雾滴在叶面的沉积率超过倾角较小时。这是由于,蜡质叶面表面光滑,并且附着一层非极性有机质,当叶片具有倾角时,雾滴碰撞到蜡质叶片表面时会同时产生反弹和滚落而造成药液损失。然而,随着倾角不断增大,雾滴向下作用力却不发生改变,因而与叶面垂直方向的冲击力会逐渐减弱,当叶面倾角达到某一角度后,雾滴与叶片的碰撞便不足以使雾滴产生反弹作用,此时雾滴主要损失只剩下滚落作用,沉积率反而较叶面倾角较小时有所增大。

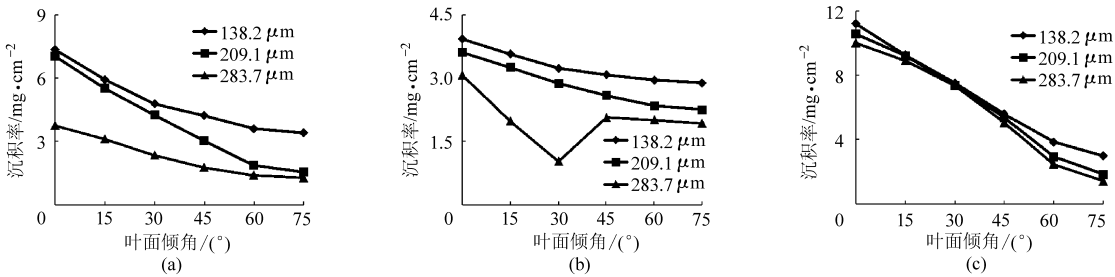


图 4 不同粒径下沉积率和叶面倾角关系曲线
Fig.4 Curves for deposition and leaf dips under different surface structures
(a) 毛刺 (b) 蜡质 (c) 粗糙

2.2 正交试验结果和方差分析

正交试验方案和结果如表 4 所示。为分析雾滴在沉积过程中叶面结构、叶片倾角、雾滴粒径对沉积效果的影响差异,对试验结果进行多因素方差分析,如表 5 所示。

表 4 正交试验洗脱液透光率测定结果及叶片沉积率						
Tab.4 Light transmission rate of eluents and related deposition of orthogonal test						
试验号	因素				透光率	沉积率 Q
	A	B	C	D	T/%	/mg·cm ⁻²
1	1	1	1	1	0.423	7.37
2	1	2	2	2	0.593	4.26
3	1	3	3	3	0.800	1.39
4	2	1	2	3	0.658	3.61
5	2	2	3	1	0.848	1.03
6	2	3	1	2	0.859	2.95
7	3	1	3	2	0.201	10.02
8	3	2	1	3	0.412	7.53
9	3	3	2	1	0.734	2.94

从方差分析显著性来看,P 值越小,因素影响越显著,P 值越接近于 1,该因素影响越不显著。正交试验结果表明,叶片倾角及叶面结构对雾滴沉积率影响最为明显,其中叶片倾角影响效果略高于叶面结构;雾滴粒径对雾滴沉积率影响相对较小。可见

喷雾作业时有必要针对靶标叶面和植株生长形势合理选择喷雾角度。

表 5 正交试验方差分析					
Tab.5 Analysis of variance for orthogonal test					
方差来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性 P
叶面结构 A	27.966 2	2	13.983 1	4.32	0.187 8
叶片倾角 B	31.760 3	2	15.880 1	4.91	0.169 2
雾滴粒径 C	9.054 1	2	4.527 0	1.40	0.416 6
误差 D	6.466 5	2	3.233 2		
总计	75.247	8			

3 结论

- (1) 通常情况下,雾滴在叶面沉积率随雾滴粒径增大而减小;但在毛刺叶片表面,当雾滴粒径超过 235.1 μm 时,药液沉积率随雾滴粒径增大而减小的趋势更为明显。
- (2) 在毛刺和粗糙叶片表面,药液沉积率随叶面倾角增大而减小;而对于蜡质叶片,当叶面倾角超过 45°时,药液沉积率会产生一次突增并超过较小倾角时的雾滴沉积率。
- (3) 正交试验分析结果表明,叶片倾角对雾滴沉积率影响最大,叶面结构影响效果略低于叶片倾角,雾滴大小对药液沉积率影响不显著。

参 考 文 献

1 祁力钧,傅泽田,史岩. 化学农药施用技术与粮食安全[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6):203 ~ 206.
Qi Lijun, Fu Zetian, Shi Yan. Technology of pesticide application and food security[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 203 ~ 206. (in Chinese)

2 Lin Jianzhong, Qian Lijuan, Xiong Hongbin, et al. Effects of operating conditions on droplet deposition onto surface of atomization impinging spray[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(12):1 733 ~ 1 740.

3 朱金文, 吴慧明, 朱国念. 雾滴大小与施药液量对草甘膦在空心莲子草叶片沉积的影响[J]. 农药学学报, 2004, 6(1): 63 ~ 66.
Zhu Jinwen, Wu Huiming, Zhu Guonian. Influence of droplet size and spray volume on deposition of glyphosate on alligator weed leaves[J]. Journal of Pesticide Science, 2004, 6(1):63 ~ 66. (in Chinese)

4 Wise J C, Jenkins P E, Schilder A M C, et al. Sprayer type and water volume influence pesticide deposition and control of insect pests and diseases in juice grapes[J]. Crop Protection, 2010, 29(4):378 ~ 385.

5 吕晓兰, 傅锡敏, 吴萍, 等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6):71 ~ 75.
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):71 ~ 75. (in Chinese)

6 Maski D, Durairaj D. Effects of charging voltage, application speed, target height, and orientation upon charged spray deposition on leaf abaxial and adaxial surfaces[J]. Crop Protection, 2010, 29(2):134 ~ 141.

7 Yu Y, Zhu H, Ozkan H E, et al. Evaporation and deposition coverage area of droplets containing insecticides and spray additions on hydrophilic, hydrophobic, and leaf surfaces[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1):39 ~ 49.

8 Xu Linyun, Zhu Heping, Ozkan H E. Surfactant droplet evaporation and deposition patterns on waxy leaf surface [C] // 2009 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 096671. Nevada: Reno, 2009.

9 袁会珠. 农药雾滴沉积流失规律以及降低容量喷雾技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
Yuan Huizhu. Studies on the deposition and run-off of pesticide droplets on crop leaves and pesticide application by reduced spray volume rate[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)

10 祁力钧, 王沛, 张建华, 等. 杂草叶片表面结构对雾滴铺展和蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3):335 ~ 340.
Qi Lijun, Wang Pei, Zhang Jianhua, et al. Influence of weed leaves surface structures on droplet spread and evaporation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3):335 ~ 340. (in Chinese)

11 陆军, 贾卫东, 邱白晶, 等. 黄瓜叶片喷雾药液持留量试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4):60 ~ 64.
Lu Jun, Jia Weidong, Qiu Baijing, et al. Experiment on retention of spray liquid on cucumber leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):60 ~ 64. (in Chinese)

(上接第 85 页)

18 马征,李耀明,徐立章. 油菜脱出物漂浮速度及摩擦与浸润特性的测定与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):13 ~ 17.
Ma Zheng, Li Yaoming, Xu Lizhang. Testing and analysis on rape excursion components characteristics in floating, friction and wettability[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 13 ~ 17. (in Chinese)

19 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.

20 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2):48 ~ 51.
Liao Qingxi, Zhang Ning, Zhang Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48 ~ 51. (in Chinese)

21 李耀明,马征,徐立章. 油菜联合收获机粘附物摩擦特性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12):54 ~ 57.
Li Yaoming, Ma Zheng, Xu Lizhang. Tribological characteristics of adhesive materials on cleaning sieve of rape combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2010, 41(12): 54 ~ 57. (in Chinese)

22 刘德军,赵秀荣,高连兴,等. 不同收获方式含水率对油菜收获物流损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):339 ~ 342.
Liu Dejun, Zhao Xiurong, Gao Lianxing, et al. Effect of moisture content on rape harvest logistics losses under different harvest methods[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 339 ~ 342. (in Chinese)

23 孙进,李耀明,徐立章. 油菜联合收割机清选装置研究动态和技术分析[J]. 农机化研究, 2006(6):62 ~ 64.
Sun Jin, Li Yaoming, Xu Lizhang. Technique analysis on the research of cleaning unit of rape combined harvester[J]. Journal of Agricultural Machanization Research, 2006(6):62 ~ 64. (in Chinese)

24 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.