

新型蔬菜清洗机的研制

杨红兵, 丁为民*, 陈坤杰, 李毅念, 王平会

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 分析了超声波和气泡作为蔬菜清洗动力的机理。设计制造了以超声波和气泡为清洗动力的蔬菜清洗试验机。以试验机为基础进行蔬菜清洗正交试验, 确定了适合蔬菜清洗的工艺参数: 超声波功率 450 W、气泡强度 25 m³/h、清洗时间 4 min。以此试验参数为依据研制了蔬菜清洗机。试验表明, 该清洗机每小时清洗叶类蔬菜 120 kg 以上, 其洗净率大于 95%, 破损率小于 2%; 每小时清洗根茎类蔬菜 240 kg 以上, 其洗净率大于 90%, 破损率小于 1%。

关键词: 蔬菜; 清洗机械; 工艺参数; 超声波; 气泡

中图分类号: S233.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)01-0092-05

0 引言

蔬菜清洗是蔬菜加工和净菜生产中必不可少的工序之一。目前, 蔬菜清洗主要依靠手工, 其机械化程度很低; 现有的蔬菜清洗机有振动喷淋式和滚筒式两种。振动喷淋式蔬菜清洗机^[1]有两个清洗池, 蔬菜先在振动清洗池中作往复运动, 进行初步清洗, 然后进入喷淋池中用清水喷淋, 完成整个清洗过程。该清洗机耗水量大, 对叶类蔬菜有较大的损伤。滚筒式清洗机^[2]的主体是一个倾斜的金属网状圆柱形旋转体, 在圆柱的中心轴部位装有许多喷嘴的喷射水管, 蔬菜随圆柱不停转动的同时受到喷射水流的冲刷作用, 达到清洗的目的。该清洗机只能完成土豆、山芋等根茎类蔬菜的清洗, 且清洗时对蔬菜损伤较大, 不能应用于叶类蔬菜的清洗。为此, 设计了以超声波和气泡作为蔬菜清洗动力的新型蔬菜清洗机。试验表明, 该清洗机械能有效去除蔬菜表面的污染物, 且对蔬菜(包括叶类蔬菜)损伤很小。

1 超声波和气泡清洗蔬菜的机理探讨

1.1 超声波清洗蔬菜的机理

超声波清洗的主要清洗动力是超声空化作用^[3,4]。存在于液体中的空化核在超声场的作用下振动, 当声压达到某个临界值时, 空化泡将迅速增长, 然后突然闭合, 在空化泡闭合瞬间产生压力很大的冲击波, 破坏蔬菜表面的污染物使之溶解在清洗液中。空化泡对污染物的反复冲击, 一方面破坏污染物和蔬菜之间的吸附作用, 另一方面也会使污染物从蔬菜表面脱落。空化气泡在振荡过程中, 伴随一系列的复杂的声学效应如产生辐射扭力。辐射扭力能引起液体本身的环流运动, 该环流能对蔬菜表面的污染物造成破坏从而使之从蔬菜表面脱落。

另外, 超声高频振荡自身也对清洗有重要的贡献。例如: 频率为 20 kHz, 功率密度为 2 W/cm² 的超声波在液体中传播时, 引起质点的振动位移 1.32 μm, 速度 0.16 m/s, 加速度 2.04 × 10⁴ m/s², 声压为 2.5 × 10⁵ Pa (2.45 atm)^[5]。蔬菜表面的污染物主要有尘土、肥料、腐殖质和残余农药。如果上述蔬菜表面的污染物是不可溶解的, 超声波的稳态空化和微声流可以在蔬菜表面处提供一种溶解机制而使污染物溶解, 在污染物层和蔬菜表面之间形成的稳态空化泡会使腐殖质等污染物脱落。稳态空化和微声流有助于在水溶液中将农药等油脂类污染物乳化, 使之脱落。超声波的瞬态空化作用能击碎尘土和肥料等不溶污染物, 达到蔬菜清洗的目的。

1.2 气泡清洗蔬菜的机理

1.2.1 气泡溃灭时产生的气蚀作用

在含有许多气泡的液体中, 当气泡溃灭和回弹再生时, 会产生巨大的瞬时压强。当溃灭的气泡靠近过流的固体边界时, 水流中不断溃灭的气泡所产生的高压强的反复作用, 可破坏固体表面, 从而产生气蚀现象。气泡在蔬菜表面附近的破裂, 近于球形的气泡随射流运动到刚性固体表面附近。由于淹没射流在固体表面形成一层很薄的漫流, 所以在气泡与蔬菜表面之间存在着液流的横向流动, 使气泡壁距蔬菜表面近的一端(称为近壁)较远的一端(称为远壁)的液体压力低, 向心运动速度也较其它部分慢。在气泡中心向蔬菜表面移动时, 近壁与蔬菜表面的距离基本不变, 为保持动量守恒(不考虑液体黏性的影响), 气泡必须做加速运动, 远壁向内凹进, 靠近近壁, 近壁被穿透形成速度很高的微射流, 这种微射流指向蔬菜表面, 其破坏和冲蚀能力很强^[6], 如图 1 所示。Hammit 通过计算和实测得出, 游移型气泡溃灭时, 靠近固体壁面处的微射流速度可达 70~180 m/s, 在固体表面的冲击压力可达 140~180 MPa^[7]。这么高的动压力可以完全清洗掉蔬菜表面的污染物而且可以缩短清洗时间。而且, 这仅仅是一次微射流作用于蔬菜表面的压力; 当水中气泡不断产生、增长、破灭时, 则气泡溃灭的冲击压力连续不断作用到蔬菜表面, 有效的清除蔬菜表面的污染物。

1.2.2 气流引起水的翻滚、漩涡等复杂的扰动

在蔬菜清洗过程中, 蔬菜、水和气流一起组成了一

收稿日期: 2004-04-05 修订日期: 2004-05-30

基金项目: 江苏省科技攻关项目“净菜加工设备的研制”(BE2001392)

作者简介: 杨红兵(1979-), 男, 湖北监利人, 硕士, 主要从事蔬菜清洗设备的研制和计算机模拟与控制方面的研究。南京 南京农业大学工学院, 210031

通讯作者: 丁为民, 教授, 博导, 南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: wmding@jlonline.com



图 1 气泡在刚性固体表面破裂的示意图

Fig. 1 Sketch of air bubble's break on the surface of solid

个非常复杂的固-液-气三相流动。当气体以一定的速度射入清洗槽中的液体时,将引起液体的流动。液体在流动过程中,运动较快的流层带动较慢的流层,而运动较慢的流层又阻止较快的流层,不同速度流层之间互相牵制,产生层与层之间的摩擦力。即流体在流动过程中由于液体的黏性而产生的内摩擦力^[8]。管中的空气以一定的速度进入液体中时,在液体相邻两流层之间,存在内摩擦力和动量的交换。这样直接导致清洗槽中的液体和清洗物无规则的扰动,这种无规则的扰动能有效去除蔬菜表面的污染物。

2 清洗工艺参数的确定

2.1 蔬菜清洗试验机的设计

设计了以超声波和气泡作为蔬菜清洗动力的清洗试验机,该试验机由超声波发生源、超声换能器、风泵、气阀、流量计、清洗槽和网孔面板组成。超声换能器通过信号线与超声波发生源相连。超声换能器将超声波发生源的高频电振荡信号转换为机械振动信号,用来产生一定频率,一定声功率密度的超声波。风泵是气流的发生源。气阀调节通入清洗槽中的风量,改变气阀的开度大小达到调节气流量的目的。流量计测量通风量的大小。网孔面板是产生气泡的装置。一定强度和大小的气流通过网孔面板产生分流现象,导致一定压力和速度的微小气流产生,使清洗槽的液体产生气泡和翻滚。清洗槽盛装清洗液和清洗物。试验机结构如图 2 所示。其中超声波的功率为 0~1000 W 可调,工作频率 20 kHz;清洗槽内尺寸 600 mm×400 mm×200 mm;流量计的测量范围为 2.5~25 m³/h;风泵的功率为 1.2 kW。

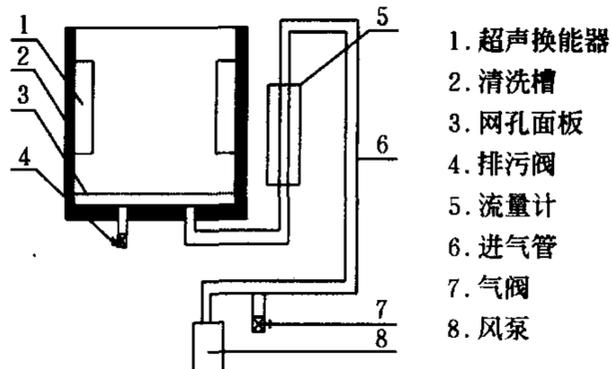


图 2 蔬菜清洗试验机示意图

Fig. 2 Diagram of vegetable cleaning tester

2.2 试验设计及数据分析

2.2.1 试验目的和试验指标的确定

试验目的是寻找最佳蔬菜清洗效果的工艺参数。即保证蔬菜清洗干净和蔬菜无破碎的情况下清洗时间最

短,耗费能量最少。为了对蔬菜清洗进行定量的分析研究,参照蔬菜行业业内人士的观点,确定蔬菜清洗试验结果的指标为洗净率和破损率,分别定义如下:

$$\text{洗净率} = \frac{\text{清洗干净的蔬菜质量(g)}}{\text{清洗干净的蔬菜质量(g)} + \text{未被清洗干净的蔬菜质量(g)}} \times 100\%$$

$$\text{破损率} = \frac{\text{清洗后无破损的蔬菜质量(g)}}{\text{清洗后无破损的蔬菜质量(g)} + \text{清洗后有破损的蔬菜质量(g)}} \times 100\%$$

其中,清洗干净的蔬菜定义为清洗后肉眼观察蔬菜上无泥沙、无烂叶、无腐殖质。

2.2.2 试验因素及水平的确定

由超声波和气泡清洗蔬菜的机理分析可知,试验中影响试验指标的因素将是超声波的声功率密度、气泡强度和清洗时间以及它们之间的交互效应。通过分析对比正交试验表格并考虑试验实际情况,选择三水平的正交试验表格来安排试验^[9]。试验为 3 因素且考虑其交互作用的 3 水平试验,每两个因素的交互作用占两列,3 个因素的所有一级交互作用共有 3 个,共占 6 列;连同 A、B、C 3 个因素自身在正交表中占 9 列,即为 9 因素三水平的正交试验,应当选 L₂₇(3¹³)正交表^[10]。这 9 个因素依次为:超声波的声功率密度 A、气泡强度 B、清洗时间 C 以及它们之间的交互作用(A×B)₁、(A×B)₂、(A×C)₁、(A×C)₂、(B×C)₁、(B×C)₂。为了找到各因素的水平范围,做了探索性预备试验。

1) 气泡强度和清洗时间对蔬菜清洗效果的影响

气泡强度 B 依次选 5、10、15、20、25 m³/h 5 个水平,清洗时间 C 依次选 1、2.5、4 min 3 个水平做小青菜清洗试验,试验数据如表 1 所示。从试验数据表可知,当气泡强度小于 15 m³/h 时,蔬菜的洗净率很低,当气泡强度大于 15 m³/h 时,洗净率显著提高;当清洗的时间 1 min 为时,蔬菜的清洗效果很差,当清洗时间为 2.5 min 时,蔬菜的洗净率显著提高。

表 1 蔬菜清洗数据表

Table 1 Vegetable cleaning data

试验号	B/m ³ ·h ⁻¹	C/min	洗净率/%
1	5	1	18
2	5	2.5	19
3	5	4	67
4	10	1	46
5	10	2.5	57
6	10	4	77
7	15	1	67
8	15	2.5	70
9	15	4	84
10	20	1	68
11	20	2.5	69
12	20	4	90
13	25	1	69
14	25	2.5	77
15	25	4	87

2) 超声波对蔬菜清洗效果的影响

用不同功率大小的超声波做蔬菜清洗试验,通过试

验发现:当超声波功率超过 600 W 时,蔬菜表面有明显的破损痕迹;当超声波功率低于 300 W 时,蔬菜的清洗效果很差。

通过气泡强度和清洗时间对蔬菜清洗效果的影响与超声波对蔬菜清洗效果影响预备试验的分析,确定各试验因素选用如下三个水平。即:

A: $A_1 = 300 \text{ W}, A_2 = 450 \text{ W}, A_3 = 600 \text{ W}$
 B: $B_1 = 15 \text{ m}^3/\text{h}, B_2 = 20 \text{ m}^3/\text{h}, B_3 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$
 C: $C_1 = 2 \text{ min}, C_2 = 3 \text{ min}, C_3 = 4 \text{ min}。$

2.2.3 试验方案及试验数据

把试验参数条件和试验结果指标依次填入 $L_{27}(3^{13})$ 正交表中,如表 2 所示。

表 2 正交试验方案和试验数据表
 Table 2 Orthogonal experimental scheme and tested data

试验号	1 A	2 B	3 (A × B) ₁	4 (A × B) ₂	5 C	6 (A × C) ₁	7 (A × C) ₂	8 (B × C) ₁	11 (B × C) ₂	洗净率 /%
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	74
3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	78
4	1	1	1	1	3	3	3	3	3	83
5	1	2	2	2	1	1	1	2	3	72
6	1	2	2	2	2	2	2	3	1	82
7	1	2	2	2	3	3	3	1	2	84
8	1	3	3	3	1	1	1	3	2	79
9	1	3	3	3	2	2	2	1	3	81
10	1	3	3	3	3	3	3	2	1	90
11	2	1	2	3	1	2	3	1	1	80
12	2	1	2	3	2	3	1	2	2	80
13	2	1	2	3	3	1	2	3	3	86
14	2	2	3	1	1	2	3	2	3	81
15	2	2	3	1	2	3	1	3	1	81
16	2	2	3	1	3	1	2	1	2	89
17	2	3	1	2	1	2	3	3	2	77
18	2	3	1	2	2	3	1	1	3	86
19	2	3	1	2	3	1	2	2	1	86
20	3	1	3	2	1	3	2	1	1	80
21	3	1	3	2	2	1	3	2	2	81
22	3	1	3	2	3	2	1	3	3	84
23	3	2	1	3	1	3	2	2	3	75
24	3	2	1	3	2	1	3	3	1	79
25	3	2	1	3	3	2	1	1	2	85
26	3	3	2	1	1	3	2	3	2	82
27	3	3	2	1	2	1	3	1	3	85
K_1	3	3	2	1	3	2	1	2	1	85
K_2	723	726	723	738	700	731	726	744	737	2205
K_3	746	728	736	732	733	733	739	728	735	
\bar{K}_1	736	751	746	735	772	772	740	733	733	
\bar{K}_2	80	81	80	82	78	81	81	83	82	
\bar{K}_3	83	81	82	81	81	81	82	81	82	
R	82	83	83	82	86	82	82	81	81	
	3	2	3	1	8	1	1	2	1	

2.2.4 试验数据分析

1) 极差分析

计算每列各水平下试验指标之和 K_1, K_2, K_3 。

以第 1 列为例,分别计算在不同超声波功率水平下的试验指标之和 K_1, K_2, K_3 和它们的平均值 $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3$ 。

$$K_1 = 74 + 78 + 83 + 72 + 82 + 84 + 79 + 81 + 90 = 723$$

$$K_2 = 80 + 80 + 86 + 81 + 81 + 89 + 77 + 86 + 86 = 746$$

$$K_3 = 80 + 81 + 84 + 75 + 79 + 85 + 82 + 85 + 85 = 736;$$

$$\bar{K}_1 = \frac{K_1}{3} = \frac{723}{9} = 80$$

$$\bar{K}_2 = \frac{K_2}{3} = \frac{746}{9} = 83$$

$$\bar{K}_3 = \frac{K_3}{3} = \frac{736}{9} = 82。$$

第 1 列的极差 $R_1 = \bar{K}_2 - \bar{K}_3 = 83 - 80 = 3$ 。同理,可计算出表中其它各列的指标和、均值和极差。结果依次填入表 2 中。由极差大小可以得出因素主次顺序依次

为C、A、(A×B)₁、B、(B×C)₁、(A×B)₂、(A×C)₁、(A×C)₂、(B×C)₂。由表2中数据初步得出较优水平组合为C₃A₂[(A×B)₁]或C₃A₂B₃或C₃[(A×B)₁]₃B₃。

2) 方差分析

根据极差分析初步找出比较好的水平组合,为了进一步找到最优的水平组合,对数据进行方差分析,方差分析的结果如表3所示。

表3 试验数据方差分析表

Table 3 Variance analysis of tested data

方差来源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F值	显著性	最优方案
A	30	2	15	2.5		A ₂
B	43	2	21.5	3.3		B ₃
C	289	2	144.5	22.2		C ₃
A×B	32	4	8	1.2	**	
A×C	20	4	5	0.8		
B×C	16	4	4	0.6		
误差	52	8	6.5			
总和	482	26				

注: $F_{0.05}(2,8) = 4.46, F_{0.01}(2,8) = 8.65, F_{0.05}(4,8) = 3.84, F_{0.01}(4,8) = 7.01$ 。

从方差分析表3的结果可以看出,因素C对试验结果指标的影响是高度显著的,因素B和因素A对试验结果指标的影响较大,其它因素对试验结果指标的影响相对较小。由于试验结果指标是蔬菜的洗净率,数据越大说明清洗效果越好。从试验方案和试验数据表可以看出,因素A应选取第2水平A₂,因素B应选取第3水平B₃,因素C应选取第3水平C₃。通过试验的数据分析可知,最好的蔬菜清洗参数为C₃B₃A₂即超声波功率为450 W、气泡强度为25 m³/h、清洗时间为4 min。

3) 验证试验及试验结论

通过正交试验和数据分析,找到比较合理的工艺参数。为了验证该工艺参数的科学性与合理性,选取了上

述试验中清洗效果比较好的试验参数条件做重复试验。以表2中的试验数据为依据,分别选取试验号为9、12、15、17、18、27的试验参数做多次重复试验。试验结果如表4所示。从表4数据可知:以超声波和气泡作为清洗叶类蔬菜的动力时,最好的工艺参数条件是超声波功率为450 W、气泡强度为25 m³/h、清洗时间为4 min。以此工艺参数清洗的蔬菜,洗净率最高,且不会损伤蔬菜。

表4 验证试验数据表

Table 4 Verifiable testing data

超声波强度 /W	气泡强度 /m ³ ·h ⁻¹	作用时间 /min	洗净率 /%
300	25	4	79
450	15	4	75
450	20	4	77
450	25	3	70
450	25	4	88
600	25	4	76

3 蔬菜清洗机结构设计

根据以上试验数据,并结合生产实际条件和技术经济指标,设计了蔬菜清洗机总体结构如图3所示。该蔬菜清洗机由驱动电机、清洗槽、超声波发生器、超声换能器、风泵、输送网带(带刮板)、气管和排污阀等主要部件组成。驱动电机带动传动链轴的运转,传动链带动输送网带。蔬菜在输送网带上刮板的作用下由进菜口运动到出菜口。清洗槽底部是超声换能器和气泡发生装置,蔬菜在随网带的运动过程中受到气泡和超声波的清洗作用。新研制的蔬菜清洗机输送网带速度为0.95 m/s;风泵的功率为2.2 kW,出风口数量为8个;超声波的功率为0~1000 W可调。分别选取了青菜(叶类)和土豆(根茎类)进行测试试验。结果表明,该清洗机每小时可以清洗叶类蔬菜120 kg以上,其洗净率大于95%,破损率小于2%;每小时可以清洗根茎类蔬菜240 kg以上,其洗净率大于90%,破损率小于1%。

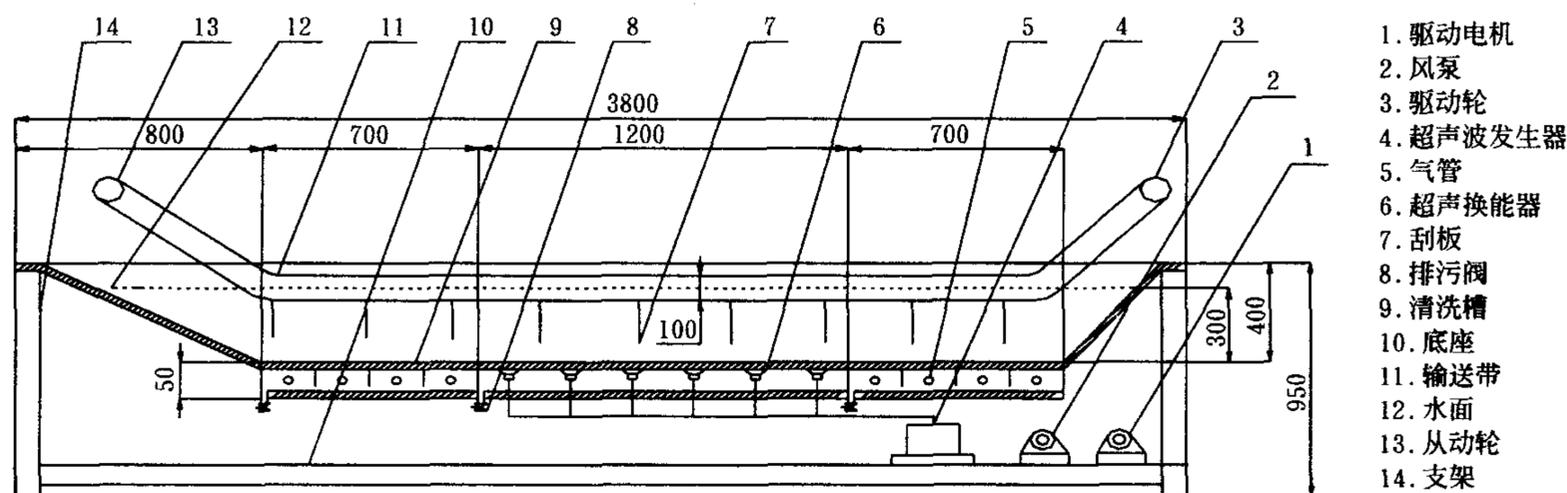


图3 蔬菜清洗机结构示意图

Fig. 3 Sketch map of washer of vegetable

[参 考 文 献]

[1] 高英武,刘毅君,任述光,等. 振动喷淋式蔬菜清洗机的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 92-95.

[2] 康 维. 食品工业清洗技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 233.
 [3] 范百刚. 超声原理与应用[M]. 南京: 江苏科学技术出版

- 社,1986,480.
- [4] Prosperetti A. Physics of Acoustic Cavitation [M]. Frontiers in Physical Acoustics,1986,145-183.
- [5] 冯若,黄金兰. 超声清洗及其物理机制[J]. 应用声学,1994,13(1):45.
- [6] 王萍辉. 空化射流在管道清洗中的应用[J]. 电力科学与工程,2002,4:21-24.
- [7] 李根生,沈晓明,施立德,等. 空化和空蚀机理及其影响因素[J]. 石油大学学报(自然科学版),1997,21(1):97-101.
- [8] 王致清. 流体力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,1987,431.
- [9] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996,399.
- [10] 吴贵生. 试验设计与数据处理[M]. 北京:冶金工业出版社,1997,234.

Research and development of a new-style washer of vegetable

Yang Hongbing, Ding Weimin*, Chen Kunjie, Li Yinian, Wang Pinghui

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: The mechanism of using ultrasound and air bubble to clean vegetable was analyzed and the vegetable cleaning tester was developed. The orthogonal test of vegetable cleaning was done in this tester and the optimum parameters of vegetable cleaning was discovered as follows: the ultrasonic power is 450 W, the air bubble's intensity is 25 m³/h and the cleaning time is 4 min. The washer of vegetable was developed on the basis of the optimum parameters. When the washer was used to clean leaf vegetable, the productivity, abluent ratio and breakage were over 120 kg per hour, more than 95% and less than 2%, respectively. When the washer was used to clean rhizome vegetable, the productivity, abluent ratio and breakage were over 240 kg per hour, more than 90% and less than 1%, respectively.

Key words: vegetable; washer; ultrasound; air bubble

杨红兵,丁为民,陈坤杰,等. 新型蔬菜清洗机的研制[J]. 农业工程学报,2005,21(1):92-96.

Yang Hongbing, Ding Weimin, Chen Kunjie, et al. Research and development of a new-style washer of vegetable[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(1):92-96. (in Chinese with English abstract)

关于征集本刊封面照片的启事

为扩大信息量,适应期刊图片化、美帧化发展趋势,使期刊封面美观大方,同时为加大对重大科研项目或创新性科研成果的报道力度,扩大其传播范围,促进成果的推广应用,见证、记录和保存各个历史时期的具有代表性的优秀科研成果,本刊决定在每期的封面刊登农业工程领域重大项目或创新性科研成果照片。为了加强对成果的宣传报道,配合封面照片,在内文中用黑白页刊登该项目成果的文字介绍,根据文字的长短可以采用整页或半页。封面照片尽可能清晰,可以提供照片,也可以提供数码图片。内页文

字介绍的内容可以包括科研课题项目名称、项目主持人及课题组成员简介及联系方式,项目的主要创新性成果与所获得的专利,推广应用情况,主要技术特点与工艺参数等。图片和文字内容均由作者提供,文责自负。此举旨在扩大信息量,加大对科研项目成果的报道,重在社会效益,不以赢利为目的,只适当收取制作与印刷成本费。《农业工程学报》是广大农业工程科技工作者共同的园地,本刊愿竭诚为大家的科研成果做好宣传服务。欢迎大家踊跃投稿!

(王应宽)