

蔡高委, 丛锦玲, 齐贝贝. 花生种子三轴方向起始破碎力[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 716-721.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.03.030

花生种子三轴方向起始破碎力

蔡高委¹, 丛锦玲^{1,2}, 齐贝贝¹

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 农业部西北农业装备重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 针对花生排种过程中存在的机械破损问题, 以花生品种四粒红不同条件下的初始破碎力为指标, 开展花生三轴方向上的起始破碎力测定试验。采用全组合试验方法, 以压缩速度、含水率为因素, 分析了花生种子在不同含水率和不同压缩速度条件下 x 、 y 、 z 三轴方向起始破碎力的变化规律。结果表明: 当浸泡温度 20 ℃, 浸泡时长为 3 h, 花生含水率达 15.4% 时, 起始破碎力在三轴方向均最大; 在不同压缩速度下, 花生种子起始破碎力沿 x 轴方向最大, 沿 z 轴方向最小, 分别平均为 35.86 N、22.35 N; 同一压缩速度下, 花生种子起始破碎力随含水率变化呈先增大后减小的趋势。该研究成果为进一步研究花生种子的力学特性、损伤机理及播种机的研发提供依据。

关键词: 花生种子; 含水率; 起始破碎力; 损伤机理

中图分类号: S565.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)03-0716-06

Experimental study on initial crushing force of peanut seeds in triaxial direction

CAI Gao-wei¹, CONG Jin-ling^{1,2}, QI Bei-bei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture, Shihezi 832000, China)

Abstract: In order to solve the problem of mechanical breakage in peanut seed metering, the initial crushing force of Silihong was taken as an index to test in triaxial direction. Taking compression speed and moisture content as factors, the variation of initial crushing force of peanut seeds in the directions of x , y and z under different water content and compression speed was analyzed by using the whole combination test method. The results showed that when the soaking time was 3 h, the soaking temperature was 20 ℃, and the moisture content was 15.4%, the initial crushing force of peanut seeds was the largest in triaxial direction. Under different compression speed, the initial crushing force of peanut seeds was the largest along x axis, and z axis the smallest along, with on average of 35.86 N and 22.35 N, respectively. At the same compression rate, the initial crushing force of peanut seeds increased first and then decreased. The results will be helpful for further study on mechanical properties, damage mechanism and the research and development of seeding machine.

Key words: peanut seed; moisture content; initial crushing force; damage mechanism

中国是花生生产大国, 花生种植面积仅次于印

度, 产量居世界首位^[1-3]。花生主要用于榨油、制作花生蛋白和花生酱等领域, 用途广泛。据统计数据显示, 花生油占国内食用油消费总量的 25%, 此外, 花生酱由于营养价值高且不含胆固醇、风味独特、食用方便, 在西方国家颇受欢迎, 是出口创汇的优质产品^[4]。播种是花生生产过程的重要环节, 在机械化播种过程中, 种子为播种作业的工作对象。但花生

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51865052); 石河子大学重大科技攻关项目(gxjs2014-zdgg03)

作者简介: 蔡高委(1990-), 男, 河南郸城人, 硕士研究生, 主要从事农业机械设计研究。(E-mail) 793576475@qq.com

通讯作者: 丛锦玲, (E-mail) jlcong@shzu.edu.cn

种子皮薄,种形不规则,在播种过程中容易受到挤压作用而发生损伤,影响种子的出苗率,造成花生的减产^[5-6]。为此,研究花生种子在不同条件下的受压特性,对于研究花生排种器、寻找适宜播种条件和降低种子的损伤率都具有重要意义。

目前,国内学者对西瓜^[7]、玉米^[8-9]、荔枝^[10]、莲仁^[11]、红枣^[12-13]、核桃^[14]等种子的力学特性进行了研究和分析,但针对花生种子起始破碎力的研究较少。本研究利用 TA-XT plus 质构仪对花生种子在 x 、 y 、 z 三轴方向的起始破碎力进行试验研究,探究花生种子起始破碎力与花生含水率和压缩速度的关系,分析花生种子的力学特性^[15-17]。探明不同条件下花生的损伤机理,为花生播种和产品加工等机械装备提供设计依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

本试验于 2018 年 3 月在农业部西北农业装备重点实验室进行。试验材料选择新疆地区常用的花生品种四粒红作为研究对象,试验前对花生种子进行人工清选,剔除破碎和干瘪的种子。试验设备主要有 YRG-400 人工气候箱(上海合恒仪器设备有限公司产品),MA45C-000230V1 水分测定仪(北京赛多利斯仪器有限公司产品),TA-XT plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司设计生产)。

1.2 试验方法及过程

本次试验分为 2 个步骤,第一步进行花生种子含水率的预处理,第二步进行三轴方向起始破碎力试验。

1.2.1 花生种子含水率预处理 探究花生种子含水率受浸泡时间和温度的影响。选取浸泡时间、浸泡温度 2 个试验因素,以花生含水率为试验指标,采用全组合试验方法。试验取 25 组花生种子,每组 25 粒(10 粒测含水率,15 粒备用)。分别设置人工气候箱温度为 10℃、20℃、30℃、40℃、50℃,将花生样品放于方形水槽,并将水槽放于人工气候箱,分别间隔 1 h、2 h、3 h、4 h、5 h 对花生种子进行含水率测试。每次测试 10 个数据,取平均值作为含水率的结果值。

1.2.2 三轴方向起始破碎力试验 为研究压缩速度和含水率对花生种子三轴方向起始破碎力的影响,选取压缩速度、含水率 2 个试验因素,以花生种

子三轴方向起始破碎力为试验指标。试验采用全组方法,取 25 组花生种子,每组 15 粒。种子压缩速度分别设置为 50 mm/min、100 mm/min、150 mm/min、200 mm/min、250 mm/min 5 个水平进行试验,种子含水率选取 5 个实时测得的花生含水率。每组种子在三轴方向各重复测试 5 次,取平均值作为起始破碎力的结果值。

以花生种子两子叶贴合面的竖直中心线为 z 轴建立坐标系,即 x 轴(子叶和贴合面均与试验台平行)、 y 轴(子叶水平且贴合面与试验台垂直)、 z 轴(子叶竖直且贴合面与试验台垂直),如图 1 所示。

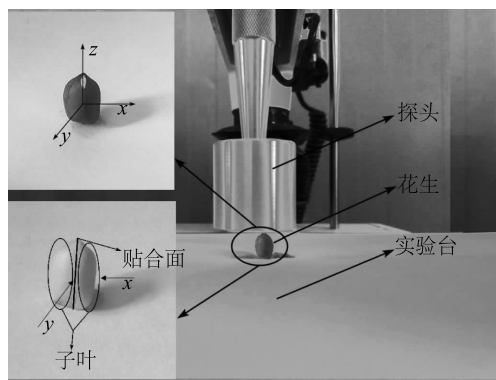


图 1 压缩试验中花生的放置方式

Fig.1 The placement of peanuts in compression test

2 结果与分析

2.1 花生含水率及变化规律

为适应花生播种条件和便于观察含水率对起始破碎力的影响,花生种子起始破碎力试验选取的 5 个含水率水平分别为 4.9%、10.6%、15.4%、21.9%、25.3%。这 5 个水平分别对应的浸泡条件为:无预处理时花生种子含水率,浸泡温度为 10℃、浸泡时长 1 h 时种子含水率,浸泡温度为 20℃、浸泡时长 3 h 时种子含水率,浸泡温度为 40℃、浸泡时长 4 h 时种子含水率,浸泡温度为 50℃、浸泡时长 5 h 时种子含水率。

花生种子由种皮和胚两部分组成,胚包括胚芽、胚轴、胚根和子叶四部分,花生种子吸水部分主要是子叶^[18]。浸泡温度分别为 10~50℃,时长 1~5 h,花生种子含水率随浸泡时间的变化关系如图 2 所示。

由图 2 可知,当浸泡时间 1~5 h,花生含水率随浸泡温度的升高而增大,不同浸泡温度之间的曲线

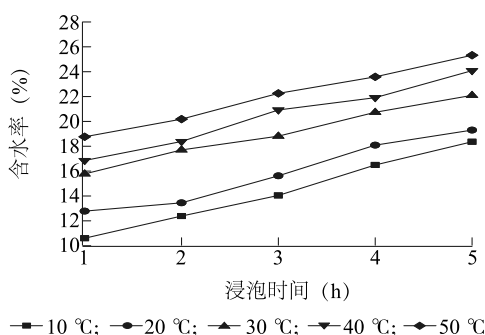


图2 浸泡时间和浸泡温度对花生种子含水量的影响

Fig.2 Effects of the soaking time and soaking temperature on water content of peanut seeds

呈近似平行关系。当浸泡时间为 1 h, 浸泡温度为 10 °C 时, 花生含水率最低, 为 10.6%; 当浸泡时间为 5 h, 浸泡温度为 50 °C 时, 花生含水率最高, 为 25.3%。

根据含水率试验结果, 利用 Origin 2016 软件对其进行回归分析, 建立一元线性回归 $y = a + bx$ (y 代表含水率, x 代表浸泡时间) 的数学模型^[19]。得出含水率与浸泡时间之间的回归方程, 如表 1 所示。

表 1 花生种子含水率与浸泡时间之间的回归方程

Table 1 Regression equation between moisture content and soaking time of peanut seeds

不同温度(°C)	回归方程	相关系数(r)
10	$y = 1.9628x + 8.4894$	0.997
20	$y = 1.7677x + 10.5465$	0.980
30	$y = 1.5664x + 14.3398$	0.996
40	$y = 1.7987x + 15.0359$	0.992
50	$y = 1.6112x + 17.1498$	0.997

由表 1 可知, 当浸泡温度在 30 °C 条件下, 回归方程的回归系数(b)最小, 为 1.566 4, 该温度条件下, 花生含水率随浸泡时间的增长速度最小; 当浸泡温度在 10 °C 条件下, 回归方程的回归系数(b)最大, 为 1.962 8, 该温度条件下, 花生含水率随浸泡时间的增长速度最大。花生含水率与浸泡时间的回归方程相关系数(r)都比较接近 1, 说明这些方程的拟合性较好。花生含水率与浸泡时间之间存在较为显著的线性关系。

综上, 花生含水率受浸泡温度和浸泡时间的影响。温度相同时, 不同浸泡时间对花生含水率具有

显著影响, 同一温度条件下含水率随着浸泡时间的增加而升高, 花生含水率和浸泡时间呈近似线形关系。时间相同时, 不同水温对花生含水率有较大影响, 水温越高, 花生种子含水率越大, 不同浸泡温度条件下, 含水率的增长速度近似相等。

2.2 花生起始破碎力变化规律分析

2.2.1 x 轴方向起始破碎力分析 花生种子在 x 轴方向起始破碎力与含水率的关系如图 3 所示。初期阶段起始破碎力随花生含水率的增加而增大, 在含水率为 15.4% 时出现转折点, 随着含水率继续增加, 花生种子起始破碎力开始减小。当含水率为 4.9%、压缩速度为 200 mm/min 时, 花生种子的起始破碎力最小, 为 25.26 N; 当含水率为 15.4%、压缩速度为 150 mm/min 时, 花生种子的起始破碎力最大, 为 50.42 N。不同含水率和压缩速度下, 花生种子起始破碎力的平均值为 35.86 N。结合图 2 可知, 当花生浸泡时间为 3 h, 浸泡温度为 20 °C 时, 花生含水率达到 15.4%, 压缩速度为 150 mm/min 时花生种子在 x 轴方向起始破碎力最大, 为 50.42 N。

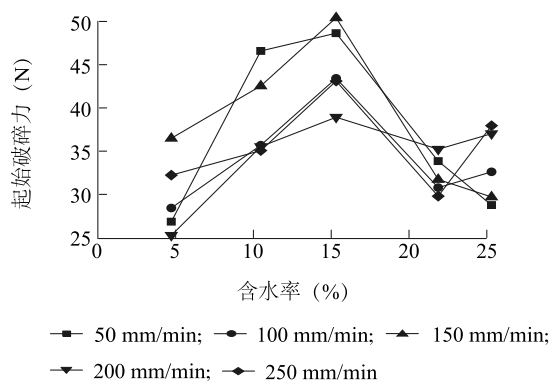


图3 x 轴方向上起始破碎力与含水率的关系

Fig.3 Relationship between moisture content and initial crushing force in x axis direction

在 x 轴方向上受力的主要部位是两片子叶, 当花生种子含水率较低时, 子叶中的结合水和游离水较少, 种子的结合力较小, 毛细管和细胞间隙疏松, 种子能承受的挤压力较小。当种子含水率升高时, 种子中的游离水增加, 毛细管中的水增多, 细胞间隙变小, 种子结构紧密, 能承受的挤压力增大, 花生种子的起始破碎力也增大。当种子含水率继续增加时, 花生种子组织间的结合力相对减小, 从而种子能承受的起始破碎力也减小。

2.2.2 y 轴方向起始破碎力分析 花生种子 y 轴方向起始破碎力与含水率的关系如图 4 所示。初期阶段起始破碎力随花生含水率的增加而增大,在花生含水率为 15.4% 时出现转折点,随着含水率继续增加,花生种子起始破碎力开始减小。当花生含水率为 4.9%、压缩速度为 250 mm/min 时,花生种子的起始破碎力最小,为 22.63 N;当花生种子含水率为 15.4%、压缩速度为 50 mm/min 时,花生种子的起始破碎力最大,为 40.56 N。不同含水率和压缩速度下,花生种子起始破碎力的平均值为 29.46 N。结合图 2 可知,当花生浸泡时间为 3 h,浸泡温度为 20 ℃ 时,含水率达到 15.4%,压缩速度为 50 mm/min,花生在 y 轴方向起始破碎力最大,为 40.56 N。

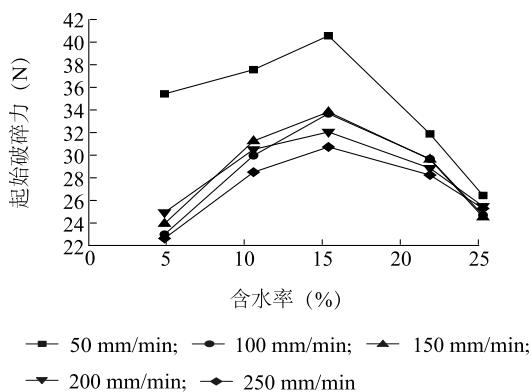


图 4 y 轴方向上起始破碎力与含水率的关系

Fig. 4 Relationship between moisture content and initial crushing force in y axis direction

在 y 轴方向上,花生种子受力部位位于两子叶相结合处,由于两片子叶没有完全结合,存在间隙,导致结合力不强。而且胚相对于子叶硬度低,容易引起花生种子在胚部出现应力集中现象^[20]。因此,花生种子承受的挤压力变小,起始破损力较小。

2.2.3 z 轴方向起始破碎力分析 花生种子 z 轴方向起始破碎力与含水率关系如图 5 所示。初期阶段起始破碎力随花生含水率的增加而增大,在含水率为 15.4% 时出现转折点,随着含水率继续增加,花生种子起始破碎力开始减小。当含水率为 4.9%、压缩速度为 250 mm/min 时,起始破碎力最小,为 15.16 N;当含水率为 15.4%、压缩速度为 100 mm/min 时,起始破碎力最大,为 27.33 N。不同含水率和压缩速度下,花生种子起始破碎力的平均值为 22.35 N。结合图 2 可知,当花生浸泡时间为 3

h,浸泡温度 20 ℃,花生含水率为 15.4%,压缩速度为 100 mm/min,花生在 z 轴方向起始破碎力最大,为 27.33 N。

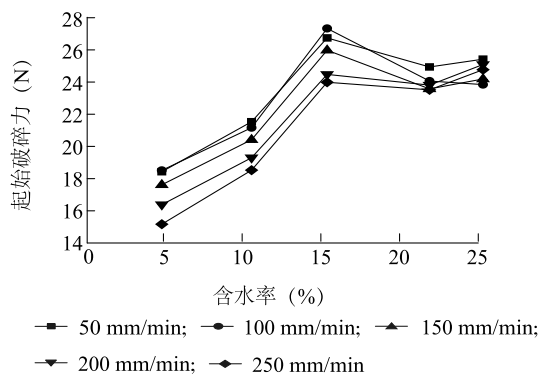


图 5 z 轴方向上起始破碎力与含水率的关系

Fig. 5 Relationship between moisture content and initial crushing force in z axis direction

当花生种子在 z 轴方向受力时,受力的主要部位是胚和子叶。胚是种子中比较脆弱的部分,虽然胚由种皮和子叶包裹,但花生的种皮不存在栅状细胞和柱状细胞,对胚和子叶的保护性能较差,能够承受的挤压力小,容易破裂。当花生在 z 轴方向受力时,两片子叶贴合面与试验台垂直,子叶容易受力发生分裂。因此, z 轴方向上花生种子的起始破碎力较其他 2 个方向小。

综上,花生种子三轴方向起始破碎力大小不同,总体上起始破碎力随含水率的增加呈先增大后减小的趋势,压缩速度对花生种子起始破碎力影响规律不明显。浸泡时间、浸泡温度对花生种子含水率的影响较大,进而影响花生种子的起始破碎力,当花生含水率达到 15.4%,即浸泡时间为 3 h,浸泡温度为 20 ℃,花生种子起始破碎力达到最大值。

2.3 方差分析

2.3.1 x 轴方向的起始破碎力方差分析 由表 2 可知,花生种子 x 轴方向的起始破碎力方差分析模型极显著且适合,显著水平为 0.001。含水率对花生种子起始破碎力影响极显著,显著水平小于 0.001,是影响花生起始破碎力的最主要因素,压缩速度对花生种子的起始破碎力影响不显著。

2.3.2 y 轴方向的起始破碎力方差分析 由表 3 可知,花生种子 y 轴方向起始破碎力方差分析模型极显著且适合 ($P < 0.001$)。含水率对花生种子起始破碎力影响极显著 ($P < 0.001$),是影响花生起始破碎

力的最主要因素,压缩速度对花生种子起始破碎力影响不显著。

表 2 花生种子 x 轴方向起始破碎力方差分析结果

Table 2 Variance analysis of the initial crushing force of peanut seeds in x axis direction

方差来源	df	平方和	均方差	F	P
压缩速度	4	60.577	15.144	0.900	0.486
含水率	4	760.017	190.004	11.303	<0.001
模型	8	820.594	102.574	6.102	0.001
总计	24	1 089.541	—	—	—

df 表示自由度, F 表示方差检验, $P < 0.05$ 表示显著, $P < 0.001$ 表示极显著。

表 3 花生种子 y 轴方向起始破碎力方差分析结果

Table 3 Variance analysis of the initial crushing force of peanut seeds in y axis direction

方差来源	df	平方和	均方差	F	P
压缩速度	4	25.703	6.426	0.633	0.646
含水率	4	689.294	172.320	16.975	<0.001
模型	8	714.997	89.374	8.804	<0.001
总计	24	877.426	—	—	—

df 表示自由度, F 表示方差检验, $P < 0.05$ 表示显著, $P < 0.001$ 表示极显著。

2.3.3 z 轴方向的起始破碎力方差分析 由表 4 可知,花生种子 z 轴方向起始破碎力方差分析模型显著且适合,显著水平小于 0.05。含水率对花生种子起始破碎力影响显著,显著水平等于 0.004,是影响花生种子起始破碎力的最主要因素,压缩速度对花生种子的起始破碎力影响不显著。

表 4 花生种子 z 轴方向起始破碎力方差分析结果

Table 4 Variance analysis of the initial crushing force of peanut seeds in z axis direction

方差来源	df	平方和	均方差	F	P
压缩速度	4	13.447	3.361	1.514	0.245
含水率	4	51.170	12.792	5.762	0.004
模型	8	64.617	8.077	3.638	0.013
总计	24	100.142	—	—	—

df 表示自由度, F 表示方差检验, $P < 0.05$ 表示显著, $P < 0.001$ 表示极显著。

种子是农业生产的基本材料,其物理特性易受多种因素的影响^[21]。通过对试验结果的方差分析,含水率对花生三轴方向上起始破碎力的影响是极显著的,而压缩速度是影响花生起始破碎力的次要因

素,对起始破碎力的影响不显著。

3 结论

(1)花生种子含水率随浸泡时间的增加而升高,花生含水率与浸泡时间之间存在较为显著的线性关系,用回归方程来描述花生含水率与浸泡时间之间的关系是合理的。同一浸泡时长下,水温高其种子含水率高,且呈线性关系。

(2)花生种子起始破碎力沿 x 轴方向最大,平均为 35.86 N;沿 z 轴方向最小,平均为 22.35 N。花生浸泡时间 3 h,浸泡温度 20 ℃ 时,含水率达 15.4%,起始破碎力最大,在 x 轴方向上,为 50.42 N,在 z 轴方向上,为 27.33 N。

(3)由于花生种子自身结构特点,三轴方向的起始破碎力大小存在差异,同一方向上,花生种子的起始破碎力随含水率的变化呈先增大后减小的趋势,起始破碎力受压缩速度的影响不显著。

(4)花生种子起始破碎力受多种因素综合影响,播种时对种子预处理选择浸泡时间 3 h,浸泡温度 20 ℃,使含水率达到 15.4% 左右时,能够降低种子的破损率。该试验结果可为花生排种器的研究提供理论参考。

参考文献:

- [1] 周曙东,孟恒宽. 中国花生主产区种植面积变化的影响因素[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 250-253.
- [2] 张 怡. 中国花生生产布局变动解析[J]. 中国农村经济, 2014(11): 73-82.
- [3] 高忠奎,蒋 菁,唐秀梅,等. 水旱轮作条件下花生品种筛选及土壤特性变化分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(12): 2403-2409.
- [4] 欧阳玲花,冯健雄. 花生食品的研究开发现状及其进展[J]. 江西农业学报, 2010, 22(12): 113-116.
- [5] 吕小莲,胡志超,于昭洋,等. 花生籽粒几何尺寸及物理特性的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2013, 34(3): 61-64.
- [6] 吕小莲,胡志超,于向涛,等. 花生种子挤压破碎机理的试验研究[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 262-266.
- [7] 戴思慧,孙小武,熊兴耀,等. 三倍体西瓜种子种壳结构及机械破壳力学特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 44-50.
- [8] 李心平,李玉柱,马福丽,等. 玉米种子抗压特性及裂纹生成规律[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 94-98.
- [9] 张 烨,方壮东,郑 菲,等. 玉米挤压特性与 ANSYS 仿真分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 196-199.
- [10] 陈 燕,蔡伟亮,邹湘军,等. 荔枝鲜果挤压力学特性[J]. 农业

- 工程学报,2011,27(8):360-364.
- [11] 马秋成,郭耿君,马 婕,等. 莲仁力学特性参数测定及挤压破碎特性试验[J].农业工程学报,2018,34(6):263-271.
- [12] 彭 俊,谢洪起,冯亚利,等. 冬枣压缩特性实验与计算仿真研究[J].食品科学,2017,38(17):20-25.
- [13] 王 伟,杨红英,黄新成,等. 红枣果肉力学特性试验研究[J].江苏农业科学,2015,43(6):404-406.
- [14] ALTUNTAS E, ERKOL M. The effects of moisture content, compression speeds, and axes on mechanical properties of walnut cultivars[J]. Food Bioprocess Technol, 2011, 4(4): 1288-1295.
- [15] 刘立意,邴媛媛,董 欣,等. 玉米秸秆压缩加载条件对其裂纹和机器功耗的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):163-169.
- [16] WANG L J, ZHOU W X, DING Z J, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology, 2015, 284(3): 187-194.
- [17] 张克平,黄建龙,杨 敏,等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J].农业工程学报,2010,26(6):352-356.
- [18] 张红生,胡 晋.种子学[M]. 2版.北京:科学出版社,2010:56-78.
- [19] 李心平,熊 师,耿令新,等. 含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(2):25-31.
- [20] 那雪姣,刘明国,张 文,等. 机械脱壳时花生仁损伤特征及规律[J].农业工程学报,2010,26(5):117-121.
- [21] 陈志德,王州飞,刘永惠,等. 花生种子人工老化对萌发期种子活力的影响[J].江苏农业学报,2011,27(6):411-413.

(责任编辑:陈海霞)