

莫海飞,陈炼红,黄琳,等. 里氏木霉产  $\alpha$ -半乳糖苷酶固体发酵条件的优化[J]. 江苏农业科学,2015,43(6):364-366,412.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.06.118

# 里氏木霉产 $\alpha$ -半乳糖苷酶固体发酵条件的优化

莫海飞,陈炼红,黄琳,王强强,伍红

(西南民族大学生命科学与技术学院,四川成都 610041)

**摘要:**采用单因素及正交试验对里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的培养基组分(碳源、氮源)及培养条件(pH 值、含水量)进行优化研究,以提高里氏木霉 Rut C-30 生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的效率。结果表明:里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的最优碳源为玉米芯与甘蔗渣复合碳源;最优氮源为硫酸铵与牛肉膏复合氮源。经正交试验分析各因素对里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的影响,显著性大小依次为:初始 pH 值 > 初始含水量 > 复合氮源配比 > 复合碳源配比;固体发酵培养基的最优配方为:玉米芯与甘蔗渣配比 4 : 1、硫酸铵与牛肉膏配比 1 : 1、初始含水量 1 g : 4 mL(碳源与营养液质量体积比)、初始 pH 值 9.0。在此优化条件下经发酵产酶培养,获得的  $\alpha$ -半乳糖苷酶活性为 256.497 U/g。

**关键词:** $\alpha$ -半乳糖苷酶;里氏木霉;固体发酵;正交试验;培养基;培养条件

**中图分类号:**TQ925 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)06-0364-03

蛋白质饲料是畜牧生产中必不可少的饲料原料,人们在不断寻求质优价廉的蛋白质饲料原料。加强对饲料及营养技术的研究,提高家禽对饲料的有效利用率,降低饲养成本,是提高养禽业经济效益的重要途径之一<sup>[1]</sup>。抗营养因子广泛存在于饲料作物及其加工产品之中,特别是在豆类及其饼粕、谷实类籽粒及其糠麸中含量相对较多,主要分为蛋白酶抑制剂、植物凝集素、多酚类化合物、植酸、抗维生素、非淀粉多糖、糖苷等。其中非淀粉多糖在饲料中含量较多,谷实类籽粒细胞壁主要由非淀粉多糖组成。非淀粉多糖是除淀粉以外的多糖类物质,有戊聚糖、葡聚糖、果胶、葡萄甘露聚糖、半乳甘露聚糖、鼠李半乳糖醛酸聚糖、阿拉伯糖、半乳糖、阿拉伯半乳糖等,它们溶于水后具有高度黏性是其抗营养作用的主要原因<sup>[2]</sup>。非淀粉多糖不能被家禽消化道的内源酶降解,只有经消化道微生物发酵后才能被利用,而发酵过程中产生的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等气体,使动物出现一系列胀气、恶心、下痢等症状<sup>[3]</sup>。由于  $\alpha$ -半乳糖苷酶可专一性催化  $\alpha$ -半乳糖苷键的水解,若在饲料中添加  $\alpha$ -半乳糖苷酶,可降解不溶性的低聚糖,提高豆粕的代谢能,同时还可消除肠道的胀气现象,甚至对其他养分的消化利用也有提高,因而在饲料生产中对  $\alpha$ -半乳糖苷酶有着极大的需求。

$\alpha$ -半乳糖苷酶(EC3.2.1.22,  $\alpha$ -galactosidase)最初是由酵母底面发酵液提制得到,加水可分解蜜二糖,故又称为蜜二糖酶,属于外切糖苷酶类,能专一性催化水解多糖、糖脂、糖蛋白中糖链末端的  $\alpha$ -1,6 半乳糖苷键。它不仅能水解棉籽糖、水苏糖、毛蕊花糖等低聚糖,还能水解含  $\alpha$ -半乳糖苷的

杂多糖<sup>[4]</sup>。里氏木霉 Rut C-30 是野生里氏木霉 QM6a 的诱变株,是一种腐生丝状真菌,作为工业发酵产酶的常见工程菌,其具有高效表达的特点,可加入适当碳源诱导物,发酵生产许多不同的酶<sup>[5]</sup>。目前,利用里氏木霉 Rut C-30 发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的研究尚未见报道。本试验通过对里氏木霉 Rut C-30 发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶培养条件的优化研究,以期达到高效生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的目的,为里氏木霉 Rut C-30 进一步用于工业化生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶奠定理论及试验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 菌株 里氏木霉 Rut C-30 菌株,由中国科学院微生物研究所提供。

1.1.2 培养基 种子培养基:马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、蒸馏水 1 000 mL、琼脂 20 g, pH 值自然即可。固体发酵培养基:取麸皮等碳源 3~5 g,按碳源与营养液质量体积比 1 g : 4 mL 加 Mandels 营养液即可。Mandels 营养液配方:KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3.0 g、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2.0 g、尿素 0.5 g、MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.5 g、CaCl<sub>2</sub> 0.5 g、FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 7.5 mg、MnSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O 2.5 mg、ZnSO<sub>4</sub> 2.0 mg、CoCl<sub>2</sub> 3.0 mg,蒸馏水定容至 1 000 mL, pH 值约为 5.5。

### 1.2 方法

1.2.1 种子制备 取里氏木霉 Rut C-30 斜面菌种,用 5 mL 生理盐水将菌苔洗下,接种 0.5 mL 至基本培养基,用涂布棒涂布均匀。置恒温培养箱 29 ℃ 培养 3~4 d。

1.2.2 固体发酵培养 于 100 mL 三角瓶中盛放 25 g 培养基,种子液孢子浓度 1 × 10<sup>6</sup> 个/mL,接种量 1 mL,于 28 ℃ 静置培养 96 h,初始含水量为碳源与营养液配比 1 : 4。

1.2.3 粗酶的提取 固体发酵结束后将固体发酵物按 8 mL : 5 g 加入醋酸-醋酸钠缓冲溶液(0.05 mol/L, pH 值 5.5),并于 40 ℃ 水浴振荡提取 30 min,转速为 150 r/min。随

收稿日期:2014-07-10

基金项目:西南民族大学研究生创新型科研项目(编号:CX2014SZ88)。

作者简介:莫海飞(1989—),男,广东茂名市人,硕士研究生,主要从事酶工程研究。E-mail:574585077@qq.com。

通信作者:伍红,副教授,研究生导师,主要从事酶工程研究。Tel:(028)85522310; E-mail:wuhong\_0203@126.com。

后将溶液以 3 000 r/min 离心 20 min, 过滤得上清液即为粗酶液。

1.2.4  $\alpha$ -半乳糖苷酶活性的测定 取上述粗酶液 0.25 mL, 加入 pH 值 5.0 的醋酸-醋酸钠缓冲液 0.25 mL 及 10 mmol/L 的 p-NPG 溶液 0.05 mL, 于 50 ℃ 水浴 10 min; 加 0.25 mol/L 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液 9.45 mL 终止反应, 于 405 nm 处测定  $D$  值。 $\alpha$ -半乳糖苷酶活性单位定义: 在 pH 值 5.0、温度 50 ℃ 的条件下, 每分钟生成 1 mmol 对硝基苯酚所需的酶量为 1 个酶活力单位 (U)。

1.2.5 单因素试验 (1) 碳源: 其他因素不变, 在不同单一碳源 (麸皮、甘蔗渣、豆粕、玉米芯、苹果粕、玉米粕、菜籽粕) 以及复合碳源 (玉米芯与甘蔗渣) 的不同配比培养条件下, 测定里氏木霉 Rut C-30 发酵产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 以确定最优碳源。(2) 氮源: 其他因素不变, 在不同单一氮源 (硫酸铵、尿素、蛋白胨、牛肉膏、硝酸钠) 以及复合氮源 (硫酸铵与牛肉膏、尿素、蛋白胨) 的培养条件下, 测定里氏木霉 Rut C-30 发酵产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 以确定最优氮源。(3) 培养基含水量: 其他因素不变, 在不同初始发酵培养基含水量的培养条件下, 测定里氏木霉 Rut C-30 发酵产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 以确定最优培养基含水量。(4) 初始 pH 值: 其他因素不变, 在不同发酵培养基初始 pH 值条件下, 测定里氏木霉 Rut C-30 发酵产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 以确定最优初始 pH 值。

1.2.6 正交试验 在单因素试验的基础上, 选择 4 因素 3 水平进行  $L_9(3^4)$  正交试验设计, 对里氏木霉 Rut C-30 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的培养条件进行优化 (表 1)。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果及分析

#### 2.1.1 碳源 测得里氏木霉 Rut C-30 在各种单一碳源培

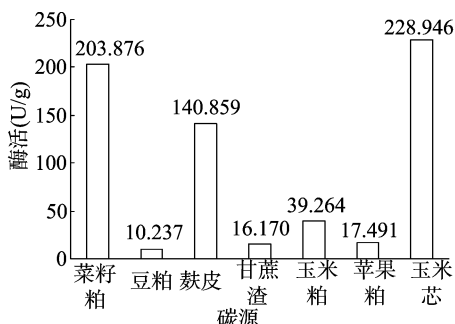


图1 不同碳源对产酶的影响

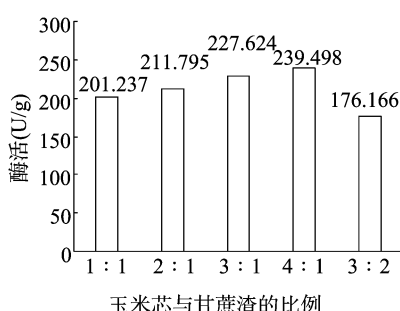


图2 玉米芯与甘蔗渣比例对产酶的影响

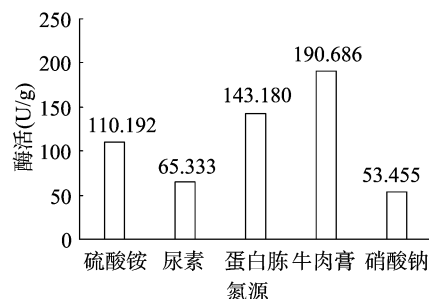


图3 不同氮源对产酶的影响

2.1.3 培养基含水量 测得里氏木霉 Rut C-30 在不同初始含水量 (甘蔗渣玉米芯与营养液的比例) 培养条件下产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 表明含水量对产酶效率的影响很大, 当含水量为 1:4 时产酶效率最高, 1:6 时则降低 (图 5)。可见含水量过高不利于发酵产酶。含水量对固体发酵有很大影响, 与液体深层发酵不同, 固体发酵中培养基含水量是非常重要的参数<sup>[6]</sup>。包被在固体基质表面的水膜可溶解微生物需要的无机盐和代谢产物, 并提供微生物生长所需的潮湿环境。另外, 基质含水量还影响着培养系统中的氧气供应、气体流动等, 是关系到固体发酵成败的制约因素。培养基含水量过低

表 1 里氏木霉产  $\alpha$ -半乳糖苷酶固体发酵条件正交试验因素与水平

因素	水平		
	1	2	3
碳源	3:1	4:1	5:1
氮源	4:1	1:1	1:4
培养基含水量	1:4	1:5	1:6
pH 值	7.0	8.0	9.0

注: 碳源为玉米芯与甘蔗渣比例; 氮源为硫酸铵与牛肉膏比例; 培养基含水量为培养基中碳源与营养液的质量体积比; pH 值为培养基的初始 pH 值。

养条件下产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 表明菜籽粕、玉米芯、麸皮的产酶效率较高, 其中玉米芯最高, 达到 228.946 U/g (图 1)。测得里氏木霉 Rut C-30 在复合碳源 (玉米芯与甘蔗渣) 不同配比培养条件下产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 表明以玉米芯和甘蔗渣作为复合碳源, 产酶效率普遍升高, 并于 4:1 时达到最高 (图 2)。因此确定以玉米芯和甘蔗渣比例为 4:1 作为本试验的碳源。里氏木霉 Rut C-30 固体发酵是好氧发酵过程, 对培养基透气性要求较高, 虽然甘蔗渣作为单一碳源产酶效率不高, 但其结构疏松, 透气性良好; 因此, 在发酵培养基中加入适量甘蔗渣可增强透气性, 有利于里氏木霉 Rut C-30 对氧的摄入, 从而提高产酶效率。

2.1.2 氮源 测得里氏木霉 Rut C-30 在不同氮源培养条件下产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 表明各单一氮源中, 蛋白胨、牛肉膏的产酶效率较高, 有机氮源比无机氮源更有利于里氏木霉 Rut C-30 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶 (图 3)。测得里氏木霉 Rut C-30 在不同复合氮源培养条件下产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 表明复合氮源产酶效率比单一氮源效率均有所提高, 其中硫酸铵与牛肉膏混合产酶效率最高 (图 4); 因此确定用硫酸铵与牛肉膏复合氮源作为后续研究里氏木霉 Rut C-30 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的氮源。

时, 空气相对湿度低, 细胞因内部水分扩散而收缩; 培养基含水量过高时, 易导致透气性降低而不利于发酵产酶, 且易造成污染, 培养基有效孔隙减少, 造成氧气供应不足。可见培养基含水量过高或过低均不利于固体发酵。

2.1.4 培养基初始 pH 值 测得里氏木霉 Rut C-30 在不同初始 pH 值条件下产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的活性, 表明当培养基初始 pH 值呈酸性时, 产酶效率偏低; 呈碱性时产酶效率较高。可见碱性条件更适于里氏木霉 Rut C-30 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶。其中 pH 值为 8.0 时产酶效率最高, 酶活达到 244.779 U/g (图 6)。

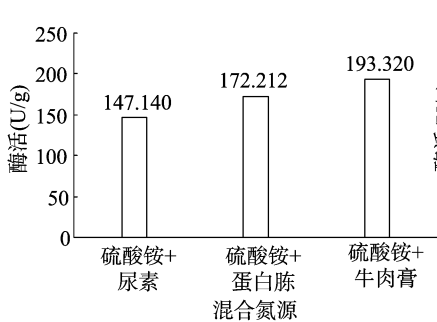


图4 不同混合氮源对产酶的影响

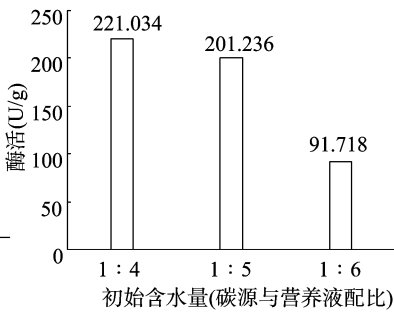


图5 初始含水量对产酶的影响

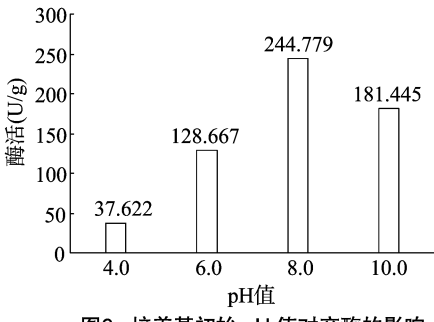


图6 培养基初始 pH 值对产酶的影响

2.2 正交试验结果分析

在单因素试验基础上,采用  $L_9(3^4)$  正交设计方案,选择培养基碳源、氮源、初始 pH 值、初始含水量 4 个主要影响因素,进行 4 因素 3 水平试验(表 2)。对正交试验结果进行方差和极差分析可知,各因素对产酶影响显著性依次为:培养基初始 pH 值 > 初始含水量 > 氮源 > 碳源。最优产酶培养基配方为  $A_2B_2C_1D_3$ ,即玉米芯与甘蔗渣配比为 4 : 1,硫酸铵与牛肉膏配比为 1 : 1,初始含水量为 1 : 4,初始 pH 值为 9.0。

按最优产酶培养基配方进行验证试验,获得里氏木霉 Rut C-30 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶活性为 256.497 U/g,达到最大产酶效率。

表 2  $L_9(3^4)$  正交试验设计与结果分析

编号	因素				平均酶活(U/g)
	A:碳源	B:氮源	C:初始含水量	D:初始 pH 值	
1	3 : 1	4 : 1	1 : 4	7.0	108.875
2	3 : 1	1 : 1	1 : 5	8.0	102.273
3	3 : 1	1 : 4	1 : 6	9.0	149.974
4	4 : 1	4 : 1	1 : 5	9.0	174.845
5	4 : 1	1 : 1	1 : 6	7.0	100.955
6	4 : 1	1 : 4	1 : 4	8.0	139.222
7	5 : 1	4 : 1	1 : 6	8.0	81.165
8	5 : 1	1 : 1	1 : 4	9.0	226.304
9	5 : 1	1 : 4	1 : 5	7.0	75.885
均值 1	120.374	121.628	158.134	95.238	
均值 2	138.341	143.177	117.668	107.553	
均值 3	127.785	121.694	110.698	183.708	
极差	17.967	21.549	47.436	88.470	

3 结论与讨论

通过单因素试验及正交试验,得到里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶培养基的最优碳源为玉米芯和甘蔗渣复合碳源,最优氮源为硫酸铵和牛肉膏复合氮源;培养基最优配方是:玉米芯与甘蔗渣配比为 4 : 1,硫酸铵与牛肉膏配比为 1 : 1,初始含水量为 1 : 4;初始 pH 值为 9.0。在此条件下产酶效率最高。

$\alpha$ -半乳糖苷酶应用广泛,在饲料工业、医药工业、食品工业等各领域均有应用<sup>[7]</sup>。在制糖工业中,它可以提高糖的产率,改善多糖结构<sup>[8]</sup>;在医学领域,它被用于改造血型、移植异种器官等<sup>[9]</sup>。而  $\alpha$ -半乳糖苷酶最主要的应用是在饲料工业领域,该酶作为一种特异性外源酶添加于含大豆粕的饲料中,可有效促进饼粕类饲料原料中  $\alpha$ -半乳糖苷物质的

分解,提高饲料营养素的利用率,消除由  $\alpha$ -半乳糖苷类物质引起的抗营养作用,为机体提供更多的能量,促进肠道有益微生物的增殖。 $\alpha$ -半乳糖苷酶提高了饲料营养价值和动物的生产性能,有助于新型饲料资源的开发,降低饲料成本<sup>[10-11]</sup>。

里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的发酵工艺中,所采用的碳源玉米芯和甘蔗渣均为农林废弃物。我国许多地区在农业生产中常产生农林废弃物,若处理不当会对环境造成很大影响,如将其焚烧会产生大量  $CO_2$  等气体,造成温室效应。本研究创新性地采用玉米芯和甘蔗渣作为发酵产酶的碳源,并得到较高的产酶效率,符合环保的可持续生产方式,应用于工业生产中有一定优势。其一,我国大量种植玉米和甘蔗的地区较多,不乏玉米芯、甘蔗渣等农作废弃物,原料易得。其二,利用农作废弃物作为生产原料不仅变废为宝,且降低成本,加大了利润率。其三,减少对农作废弃物的焚烧,起到了环保作用。由此可见,本研究通过对里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的条件优化,确定了产酶的最优条件,对实际生产有较大指导意义,为工业中发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶提供了理论基础。

本试验还发现,里氏木霉 Rut C-30 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶初始 pH 值为 9.0 左右,而文献报道的大多数真菌发酵产  $\alpha$ -半乳糖苷酶初始 pH 条件为酸性或中性<sup>[12]</sup>,这可能与菌株差异有关,该特性对于里氏木霉 Rut C-30 固体发酵生产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的应用有积极意义。碱性培养条件下微生物所产的酶制剂,其催化作用的最适 pH 值也一般在碱性范围;因此,本研究中里氏木霉 Rut C-30 所产  $\alpha$ -半乳糖苷酶可能更适合在碱性条件下加以应用,以满足生产中有特殊 pH 值要求的条件,极大拓展了  $\alpha$ -半乳糖苷酶的应用范围。

参考文献:

[1] 余冰,傅娅梅,叶楠,等. 固态发酵对复合蛋白质饲料营养价值改善效果的研究[J]. 动物营养学报,2009,21(4):546-553.  
[2] 艾晓杰. 家禽日粮抗营养因子的危害及对策[J]. 中国动物保健,2005,26(8):41-43.  
[3] 贾小雅,方热军. 非淀粉多糖抗营养作用的正确理解及酶在猪饲料中的应用[J]. 湖南饲料,2011(2):17-21.  
[4] Fialho L D, Guimarães V M, Callegari C M, et al. Characterization and biotechnological application of an acid  $\alpha$ -galactosidase from *Tachigali multijuga* Benth. seeds [J]. Phytochemistry, 2008, 69(14):2579-2585.  
[5] 安莉颖,施思,谭德勇,等. 里氏木霉 Rut C-30 产纤维素酶条件优化研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(8):4818-4820.

应用 DPS 软件对正交试验的各因素进行方差分析,从表 3 可以看出,对取苗成功率影响最大的是机械手臂的角度,其次是穴盘摩擦角和气体压力,主针的宽度对试验结果影响较小,由此可以看出各个因素之间是有交互影响的,主针宽度 C 由于影响较小可以根据试验具体情况来选择,这和单因素试验的结果也是相吻合的,因此建议用 A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>D<sub>2</sub> 作为最佳试验参数组合,即气体压力 0.4 MPa、手臂角度 30°、穴盘摩擦角度 35°时,取苗成功率最高。

表 1 试验因素水平				
水平	因素			
	A:气体压力 (MPa)	B:穴盘 摩擦角	C:主针宽度 (mm)	D:手臂角度
1	0.4	30°	2	20°
2	0.5	35°	3	30°
3	0.6	40°	4	40°

表 2 正交试验结果					
编号	A	B	C	D	取苗成功率 (%)
1	1	1	1	1	80
2	1	2	2	2	90
3	1	3	3	3	78
4	2	1	2	3	75
5	2	2	3	1	85
6	2	3	1	2	88
7	3	1	3	2	85
8	3	2	1	3	75
9	3	3	2	1	80
k <sub>1</sub>	82.67	80.00	81.00	81.67	
k <sub>2</sub>	82.67	83.33	81.67	87.67	
k <sub>3</sub>	80.00	82.00	82.67	76.00	
R	2.67	3.33	1.67	11.67	

表 3 因素显著性检测				
因素	离差平方和	自由度	均方	F 值
A	14.222 2	2	7.111 1	0.069 6
B	16.888 9	2	8.444 4	0.082 7
C	4.222 2	2	2.111 1	0.020 7
D	204.222 2	2	102.111 1	
总和	240	8		

(上接第 366 页)

[6]董荣斌,张玲,朱晓飞,等.耐热链霉菌 B221 降解羽毛角蛋白的固体发酵条件研究[J].江苏农业科学,2007(6):249-251,267.

[7]刘彩琴,陈蔚青,金建昌.α-半乳糖苷酶学性质及催化反应特性[J].食品科技,2008(10):28-31.

[8]沈汪洋,金征宇,高虹.α-半乳糖苷酶法合成α-半乳糖基-β-环糊精的研究[J].湖北农业科学,2011,50(19):4041-4043.

[9]张佳佳.饲用α-半乳糖苷酶固体扩大培养及其应用研究[D].

4 结论

采用基于 PLC 控制的针扎-夹持式取苗机械手,机械手执行前端以一定角度插入穴盘,后端(根部)设置夹持机构完成穴盘苗抓取动作,机械手采用气动装置,运动速度可以调节,具有取苗稳定、作业效率高、不易伤根的特点。

应用 ADAMS 对机械手进行了运动学仿真及合成运动的轨迹分析,确定了最优的工作速度;验证了机械手设计的合理性,完成取苗机械手样机的试制。

采用 DPS 软件对影响机械手取苗成功率的气体压力、穴盘摩擦角、主针宽度以及手臂的角度进行正交试验,结果表明,在气体压力 0.4 MPa、手臂角度 30°、穴盘摩擦角度 35°时,取苗成功率最高,该移栽机械手能够满足穴盘苗的自动化移栽要求。

参考文献:

[1]董微,周增产,卜云龙,等.穴盘苗自动移栽机研发与应用[J].农业工程,2014,4(4):120-124

[2]金鑫,李树君,杨学军,等.蔬菜穴盘苗取苗机构分析与参数优化[J].农业机械学报,2013,44(10):1-6

[3]王荣华,邱立春,田素博.我国穴盘苗机械化生产的现状与发展[J].农机化研究,2008(7):230-231

[4]张振国,曹卫彬,王侨,等.穴盘苗自动移栽机的发展现状与展望[J].农机化研究,2013,35(5):237-241.

[5]胡敏娟,尹文庆,胡飞,等.穴盘苗自动取苗试验系统的研制[J].南京农业大学学报,2011,34(3):122-126

[6]韩长杰,张学军,杨宛章,等.旱地钵苗自动移栽技术现状与分析[J].农机化研究,2011(11):238-240

[7]许美荣,于建义,张锡玉,等.工厂化穴盘育苗技术[J].中国果菜,2009(10):13-16.

[8]张晃,姬江涛,杜新武.国内外移栽机研究现状与展望[J].农业工程,2012,2(2):21-23.

[9]张会娟,胡志超,吴峰,等.国内育苗移栽机械概况与发展思考[J].江苏农业科学,2010(6):570-572.

[10]熊震宇,陈焕明,葛杨.基于 ADAMS 的弧焊机器人运动仿真[J].计算机工程与应用,2005(11):166-167.

[11]樊飞龙,雷秀,费树辉.基于 ADAMS 固定作业机器人运动仿真[J].机械工程与自动化,2006(6):29-31.

[12]王国强.虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2002:125-130.

[13]陈魁.试验设计与分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2005:7.

杭州:浙江大学,2010.

[10]Graham K K, Kerley M S, Firman J D, et al. The effect of enzyme treatment of soybean meal on oligosaccharide disappearance and chick growth performance[J]. Poultry Science, 2002, 81(7): 1014-1019.

[11]关洪英,门宇新.α-半乳糖苷酶在畜禽日粮中的应用研究进展[J].饲料博览,2012(5):34-36.

[12]穆永胜,戴求仲,张石蕊.α-半乳糖苷酶在家禽日粮中的应用[J].国外畜牧学:猪与禽,2009,29(6):92-93.