

玉米黄色素提取工艺优化及其抗癌活性研究

Extraction process optimization and anticancer activity of maize yellow pigment

于 慧 刘美佳 刘剑利 曹向宇

YU Hui LIU Mei-jia LIU Jian-li CAO Xiang-yu

(辽宁大学生命科学院, 辽宁 沈阳 110036)

(School of Life Science, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036, China)

摘要:探究超声辅助酶法制备玉米黄色素的最佳工艺,以及玉米黄色素对人胃腺癌细胞(BGC-823)生长的抑制作用。通过单因素和响应面实验,探讨超声辅助酶法制备玉米黄色素的最佳条件;用制备的玉米黄色素处理 BGC-823 细胞,并进行形态学观察和 MTT 法细胞存活率检测,初步考察其抗癌活性。超声辅助酶法提取玉米黄色素的最佳条件为:酶活力 10 000 U/g,超声功率 400 W,酶解温度 35 ℃,该条件下提取率达最大,为 $(72.64 \pm 0.42) \mu\text{g/g}$;细胞形态学观察及 MTT 细胞活力检测显示玉米黄色素对 BGC-823 细胞具有一定的生长抑制作用。超声辅助酶法提取玉米黄色素是一种有效的提取方法,制备的玉米黄色素对 BGC-823 细胞生长有较强的抑制作用。

关键词:玉米黄色素;超声波;酶法;抗癌

Abstract: Objective: To study the best preparation technology of maize yellow pigment by ultrasonic assisted with enzymatic method, and the inhibitory effect of them on the growth of human gastric cancer cells (BGC-823). Methods: The optimum conditions of maize yellow pigment were extracted by ultrasonic assisted with enzymatic method by single factor and response surface experiments. The inhibition of maize yellow pigment on BGC-823 cells was detected by morphological observation and MTT assay to evaluate the antitumor activity. Results: the maize yellow pigment best extraction condition of ultrasonic with enzymatic method is: enzyme activity 10 000 U/g, ultrasonic power 400 W, enzymolysis temperature 35 ℃, the maximum extraction yield was $(72.64 \pm 0.42) \mu\text{g/g}$ under the condition, the maize yellow pigment has a certain inhibitory effect on BGC-823

cell were studied by cell morphological observation and MTT test. Conclusion: The extraction of maize yellow pigment by ultrasonic assisted with enzymatic method is a kind of effective extraction method, the maize yellow pigment prepared has strong inhibitory effect on BGC-823 cells.

Keywords: maize yellow pigment; ultrasonic; enzymic method; anti-cancer

玉米(*Zea mays* L.)是禾本科玉米属一年生草本植物,具有种植面积广,产量大的特点。《国家粮食安全中长期发展规划(2008~2020)年》制定的粮食增产目标中,玉米份额达到 53%^[1]。近年来,玉米的应用日益广泛。在营养方面,玉米能量利用率较高。玉米中除了脂溶性维生素 E 和叶黄素含量较高,还含有谷胱甘肽,具有延缓衰老、增强免疫力等功能。在药用方面,玉米具有降压、降糖、防止动脉硬化、预防肿瘤之功效^[2]。因此,玉米的研究与开发成为国内外研究热点,越来越受到人们的关注。

玉米黄色素(Corn Color)是一种可以从玉米中提取的几种类胡萝卜素的含氧衍生物的混合物,主要由玉米黄素、黄体素、隐黄素和 β -胡萝卜素组成^[3],可广泛应用于医药、食品、包装等行业^[4]。玉米黄色素属异戊二烯类色素,具有重要的生理功能,例如抑制肿瘤的增长,预防心脑血管疾病,增强人体免疫力和预防老年性视黄斑变性等^[5]。因而开发和利用玉米中营养素——玉米黄色素具有重要的研究意义和经济价值。目前,对玉米黄色素的研究多集中于玉米黄色素的提取^[6]、纯化^[7]、稳定性^[8],而对其抗癌活性^[9]、抗氧化活性^[10]研究较少,且抗癌活性主要集中在乳腺癌^[9]、卵巢癌研究^[11]上。本试验以 BGC-823 细胞为试验研究对象,考察其抗胃癌活性,以期对人类健康和疾病预防提供一种明确生物活性的天然物质。

传统玉米黄色素的提取为有机溶剂浸提法,出于溶剂的安全性考虑,玉米黄色素的提取溶剂多选取乙醇,并辅以其它提取方法,以缩短提取时间并使提取更加充分^[6]。超声波借助机械振动,改变物质内部结构、状态、功能或加速这些过

基金项目:国家自然科学基金委员会科学部主任基金项目(编号:31240005);辽宁省农业领域青年科技创新人才培养资助计划项目(编号:2015013);辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(编号:LJQ2013002);辽宁省高等学校科学研究一般项目(编号:L2014007);辽宁大学博士科研启动项目

作者简介:于慧,女,辽宁大学在读硕士研究生。

通信作者:曹向宇(1980—),男,辽宁大学教授,博士。

E-mail:xycaolnu@163.com

收稿日期:2016—12—15

程,从而增加溶剂对细胞壁的穿透力,强化浸提过程,缩短浸提时间,已被广泛用于植物有效成分的提取。碱性蛋白酶可有效降解蛋白质,释放玉米黄色素,提高玉米黄色素的有效溶出率^[12]。本研究拟采用超声辅助酶法从玉米中提取玉米黄色素,采用响应面法对提取工艺进行优化,并在细胞水平上研究玉米黄色素对人胃腺癌细胞(BGC-823)的影响,以期对玉米黄色素的利用和抗癌功能开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米:华农 101,市售;
人胃腺癌细胞:BGC-823,中国医科大学盛京医院提供;
 β -胡萝卜素:标准品,纯度 $\geq 98\%$,国药集团化学试剂有限公司;
碱性蛋白酶:酶活力 200 000 U/g,国药集团化学试剂有限公司;
3-(4,5-二甲基噻唑-2)-2,5-二苯基四氮唑溴盐(MTT):纯度 $\geq 98\%$,美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:BS223S 型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;
高速冷冻离心机:JW-3021HR 型,安徽嘉文仪器装备有限公司;
荧光倒置显微镜:OLYMPUS DP73 型,普赫光电(上海)科技有限公司;
可见光分光光度计:721N 型,上海精密科学仪器有限公司;
冷冻干燥机:CHRIST 型,北京鑫盛鸿阳科技有限公司;
旋转蒸发仪:RE-52CS-2 型,上海虹昕电子仪器仪表有限公司;
全自动酶标仪:Sunrise 型,瑞士帝肯公司。

1.3 方法

1.3.1 玉米黄色素的提取 玉米黄色素的提取方法参照朱洪梅^[10],略有改动。玉米预处理,洗净,脱粒并粉碎,过 120 目筛备用。采用两步法提取玉米黄色素,取过筛后的玉米粉,加入碱性蛋白酶进行酶法提取,之后加入无水乙醇进行超声提取。浸提液 4 000 r/min 离心 5 min,取上清液通过三层纱布过滤,用旋转蒸发仪对滤液进行浓缩,冷冻干燥得到粉末,具体工艺:

玉米→脱粒→颗粒粉碎→加酶水解→水浴→加乙醇→超声→离心→取上清→过滤→浓缩→冷冻干燥

1.3.2 β -胡萝卜素标准曲线的测定 根据文献[13],修改如下:以无水乙醇为溶剂准确称取 β -胡萝卜素 5.00 mg,定容至 50 mL,然后分别取 1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0 mL 的溶液定容至 10 mL,再将以上溶液分别稀释 10 倍,在 446 nm 处测吸光值。空白对照组选取无水乙醇,绘制标准曲线,得到 β -胡萝卜素标准回归方程。

1.3.3 单因素试验设计 对多个单因素进行预试验,最终选取结果影响较大的 3 个因素,即:酶活力、酶解温度、超声功

率,进行单因素试验研究。

(1) 酶活力对玉米黄色素提取率的影响:称取 2.0 g 玉米粉末,加入碱性蛋白酶,酶活力分别为 4 000,8 000,12 000,16 000,20 000 U/g,加入 40 mL 蒸馏水,酶解时间 4 h,酶解温度 30 $^{\circ}\text{C}$,之后加入 60 mL 无水乙醇,超声 20 min,超声功率 200 W。浸提液 4 000 r/min 离心 5 min,上清液在 446 nm 下测吸光度,每组试验做 3 个平行。

(2) 酶解温度对玉米黄色素提取率的影响:称取 2.0 g 玉米粉末,加入碱性蛋白酶,酶活力 12 000 U/g,加入 40 mL 蒸馏水,酶解时间 4 h,酶解温度分别为:20,30,40,50,60 $^{\circ}\text{C}$,之后加入 60 mL 无水乙醇,超声 20 min,超声功率 200 W。浸提液 4 000 r/min 离心 5 min,上清液在 446 nm 下测吸光度,每组试验做 3 个平行。

(3) 超声功率对玉米黄色素提取率的影响:称取 2.0 g 玉米粉末,加入碱性蛋白酶,酶活力 12 000 U/g,加入 40 mL 蒸馏水,酶解时间 4 h,酶解温度 40 $^{\circ}\text{C}$,之后加入 60 mL 无水乙醇,超声 20 min,超声功率分别为:100,200,300,400,500 W。浸提液 4 000 r/min 离心 5 min,上清液在 446 nm 下测吸光度,每组试验做 3 个平行。

1.3.4 Box-Behnken 试验设计 应用 Design-Expert 8.0.6 软件,采用 Box-Behnken 设计,以玉米黄色素提取率为响应值,对主要单因素(酶活力、超声功率、酶解温度)进行优化,选取 3 因素 3 水平的旋转组合设计,从中筛选提取玉米黄色素的最佳工艺条件。

1.3.5 玉米黄色素抗癌活性的测定

(1) 玉米黄色素对人胃腺癌细胞损伤的形态学观察:根据文献[14],修改如下:将 823 细胞以每孔 4×10^5 个接种到 6 孔板内,每孔培养液体积 2 mL,置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 5%的 CO_2 培养箱中培养 24 h,然后设置空白组,试验组(玉米黄色素浓度 0.25,0.50,1.00 mg/mL),共同培养 24 h,在显微镜下观察细胞形态。

(2) 玉米黄色素对人胃腺癌细胞增值情况的影响:根据文献[15],修改如下:将 823 细胞以每孔 3×10^3 个接种到 96 孔板内,每孔培养液体积 200 μL ,培养 24 h 后,设置空白组,试验组(玉米黄色素浓度 0.25,0.50,1.00 mg/mL),继续培养 24 h,MTT 法检测细胞活力。

1.3.6 数据分析 试验重复 3 次,结果取平均值,采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 标准曲线的绘制

在 280~600 nm 波长范围内对 β -胡萝卜素进行全波扫描,在 446 nm 处发现 β -胡萝卜素最大波峰,因此本试验中玉米黄色素的含量计算以 446 nm 下吸光值为准。在一定浓度范围内, β -胡萝卜素的含量与其在 446 nm 处的吸光度值呈良好的线性关系($R^2=0.999\ 6$),见图 1。

2.2 单因素试验结果

2.2.1 酶活力对玉米黄色素提取率的影响 由图 2 可知,在一定范围内,随酶活力的增加,玉米黄色素提取率也随之提

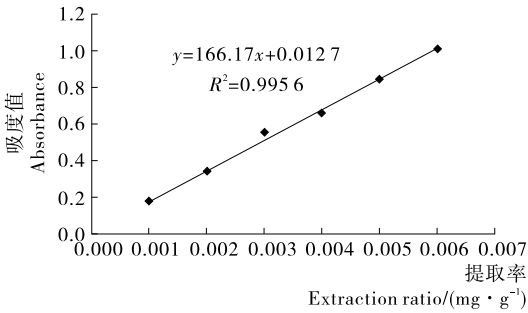


图 1 β-胡萝卜素标准曲线

Figure 1 Standard curve of β-carotene

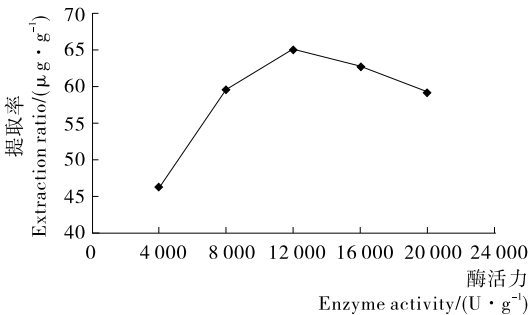


图 2 酶活力对玉米黄色素提取率的影响

Figure 2 Effect of enzyme dosage on the yield of maize yellow pigment

高,但当酶活力达到 12 000 U/g 时,玉米黄色素提取量达到最大值,之后随酶活力的增加,玉米黄色素提取率呈下降趋势。原因是当酶活力较低时,底物没有被完全酶解,随着酶活力的增加,玉米黄色素被逐渐释放,但当酶活力大于 12 000 U/g 时,酶解反应达到饱和,所以提取率不再升高^[16]。可见最佳酶活力为 12 000 U/g 时,此条件下,玉米黄色素提取率为(64.780±1.285) μg/g。

2.2.2 酶解温度对玉米黄色素提取率的影响 由图 3 可知,一定温度范围内,玉米黄色素提取率随温度升高呈现先增加后减少的趋势,当温度达到 40 ℃ 时,提取率达到最大值,为(65.69±1.21) μg/g,当温度在 40 ℃ 以上时,呈下降趋势。因此玉米黄色素提取的最佳温度为 40 ℃。

2.2.3 超声功率对玉米黄色素提取率的影响 由图 4 可知,一定范围内,随超声功率的增加,玉米黄色素提取率逐渐提高,当超声功率达到 400 W 时,玉米黄色素提取率达最大值,

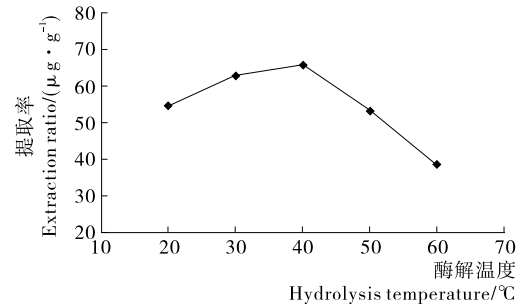


图 3 酶解温度对玉米黄色素提取率的影响

Figure 3 Effect of enzyme solution temperature on the yield of maize yellow pigment

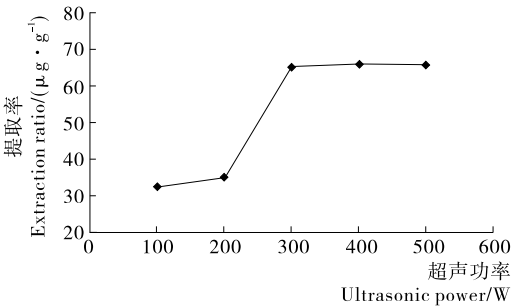


图 4 超声功率对玉米黄色素提取率的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic power on the yield of maize yellow pigment

之后随超声功率的提高,玉米黄色素提取率不再升高,功率过大会增加能耗,从节能角度考虑,选取最佳超声功率为 400 W,此条件下,玉米黄色素提取率为(65.99±0.48) μg/g。

2.3 响应面试验结果

以单因素结果为依据,细化因素水平,根据 Box-Behnken 试验设计原理得到响应面因素设计水平,见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验设计水平

Table 1 Factors and levels in Box-Behnken design

水平	A 酶活力/ (U · g ⁻¹)	B 超声功率/ W	C 酶解温度/ ℃
-1	10 000	350	35
0	12 000	400	40
1	14 000	450	45

根据试验设计得到的试验结果见表 2。

表 2 Box-Behnken 试验设计结果

Table 2 Box-Behnken design with experimental results

试验组	A	B	C	提取率/(μg · g ⁻¹)
1	1	-1	0	58.80
2	0	0	0	68.31
3	0	0	0	67.96
4	-1	0	-1	72.64
5	1	1	0	59.70
6	0	0	0	68.13
7	1	0	1	60.92
8	0	-1	1	62.35
9	-1	1	0	70.84
10	0	0	0	68.03
11	-1	-1	0	66.32
12	0	1	-1	67.23
13	0	0	0	67.91
14	0	1	1	65.72
15	1	0	-1	63.91
16	0	-1	-1	65.81
17	-1	0	1	71.14

2.4 回归模型方差分析

利用软件设计 Design-Expert 8.0.6 对数据进行多元回归拟合,获得酶活力、超声功率、酶解温度的二元多项回归方程:

$$Y=68.0-4.70A+1.28B-1.18C-0.91AB-0.37AC+0.49BC-1.14A^2-3.01B^2+0.22C^2。$$
 (1)

由表 3 可知,模型 $P<0.000\ 1$,模型显著,失拟项 $P=0.422\ 3$,失拟项不显著,另外酶活力的一次项,超声功率的一次项,酶解温度的一次项,酶活力与超声功率的交互项,酶活力与酶解温度的交互项,超声功率与酶解温度的交互项,酶活力的二次项,超声功率的二次项均达到极显著水平($P<0.01$);酶解温度的二次项达到显著水平($P<0.05$)。由 F 值可以看出各因素影响结果的主次顺序是 $A>B>C$ 。模型 $R^2=0.999\ 2$,表明模型与实际拟合程度好,模型能够解释大多数因变量的变化。综上,模型成立,拟合程度较好,试验误差较小。

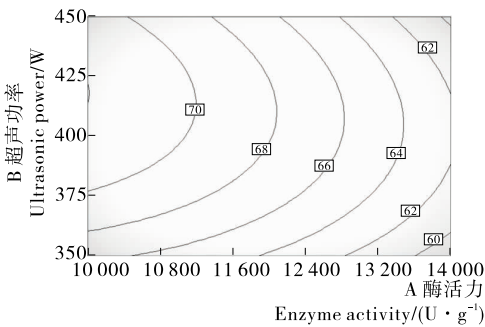
2.5 各因素交互作用的响应面分析

由图5(a)可知,当酶活力一定时,提取率随超声功率的

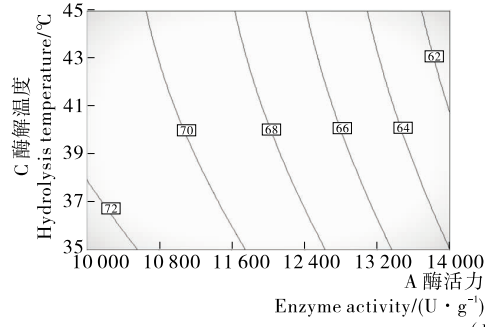
表 3 响应面试验回归模型方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance for the fitted regression model						
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Pr>F	显著性
模型	251.17	9	27.91	1 031.42	< 0.000 1	* *
A	176.81	1	176.81	6 534.66	< 0.000 1	* *
B	13.03	1	13.03	481.58	< 0.000 1	* *
C	11.19	1	11.19	413.43	< 0.000 1	* *
AB	3.28	1	3.28	121.08	< 0.000 1	* *
AC	0.56	1	0.56	20.51	0.002 7	* *
BC	0.95	1	0.95	35.13	0.000 6	* *
A ²	5.46	1	5.46	201.88	< 0.000 1	* *
B ²	38.25	1	38.25	1 413.61	< 0.000 1	* *
C ²	0.21	1	0.21	7.77	0.027 0	*
残差	0.19	7	0.027			
失拟项	0.089	3	0.030	1.18	0.422 3	
净误差	0.10	4	0.025			
总和	251.36	16				

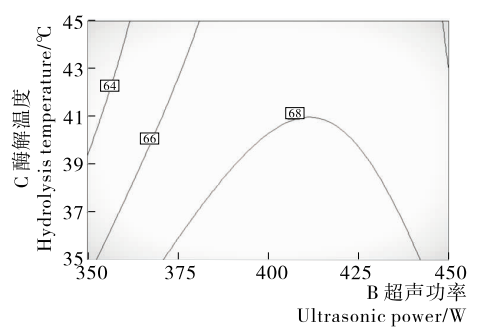
[†] * * 表示差异极显著($P<0.01$); * 表示差异显著($P<0.05$)。



(a) 酶活力与超声功率



(b) 酶活力与酶解温度



(c) 超声功率与酶解温度

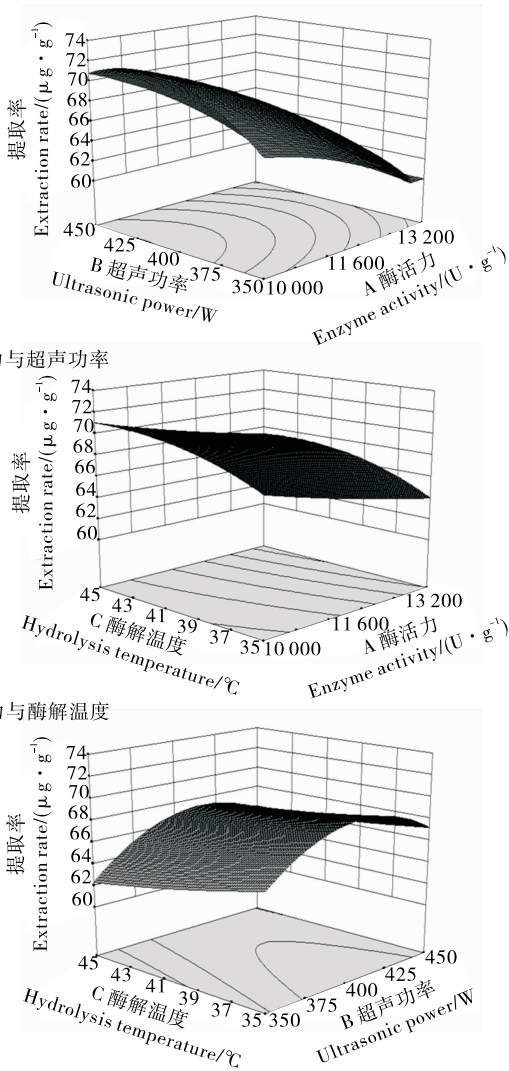


图 5 酶活力与超声功率、酶活力与酶解温度、超声功率与酶解温度相互作用等高线和响应面图

Figure 5 Response surface and contour plots for the effects of interaction between enzyme activity and ultrasonic power, between enzyme activity and enzyme solution temperature, between ultrasonic power and enzyme solution temperature on the yield of extraction ratio

增加,呈现先升高后降低的变化趋势;当超声功率一定时,随酶活力增加提取率呈下降趋势。响应曲面的坡度陡峭,表明响应值对酶活力和超声功率比较敏感,等高线的疏密程度可知,酶活力和超声功率的交互作用明显,影响显著。最优点十分接近酶活力 1 000 U/g 和超声功率 400 W,并且在这个点提取率有最大值。由图 5(b)可知,当酶活力一定,提取率随酶解温度的升高逐渐升高;当酶解温度一定时,提取率随酶活力的增加逐渐下降。从等高线可看出,两因素的交互作用较强,影响显著,相比于酶解温度,提取率对酶活力更为敏感。由图 5(c)可知,当超声功率一定时,随酶解温度的升高,提取率逐渐增加;当酶解温度一定时,随着超声功率的增加,提取率呈先升高后下降的趋势。响应曲面的坡度较为陡峭,可知响应值对超声功率和酶解温度比较敏感;由等高线疏密程度可知,超声功率和酶解温度的交互作用较显著。最优点接近于超声功率 400 W 和酶解温度 35 ℃,并且在该点提取率有最大值。

2.6 验证实验结果

通过 Design-Expert 8.0.6 软件设计,得玉米黄色素提取最佳工艺参数为酶活力 10 000 U/g,超声功率 413.99 W,酶解温度 35 ℃,此条件下玉米黄色素理论提取率为 72.90 μg/g。考虑到实际操作中遇到问题,将提取工艺修整为:酶活力 10 000 U/g,超声功率 400 W,酶解温度 35 ℃,对优化参数进行 3 次重复实验得玉米黄色素提取率为 (72.64±0.42)μg/g。预测值与实验值非常接近,进一步证明试验设计和数学模型具有可靠性和重现性。

2.7 玉米黄色素对人胃癌细胞损伤的形态学观察结果

由图 6、7 可知,空白对照组细胞贴壁状态良好,棱角清晰。随玉米黄色素试验组剂量的增加,细胞贴壁数目逐渐减少,其中 1.00 mg/mL 玉米黄色素组细胞明显变圆收缩,贴壁数目是空白组的 47.2%,与空白组相比,差异极显著(P<0.01),说明玉米黄色素对人胃癌细胞具有抑制作用,并且呈现剂量—效应关系。陆雪莹等^[17]选取木犀草素处理 BGC-823 细胞,凋亡细胞表现为细胞间隙增大,体积缩小,细胞边

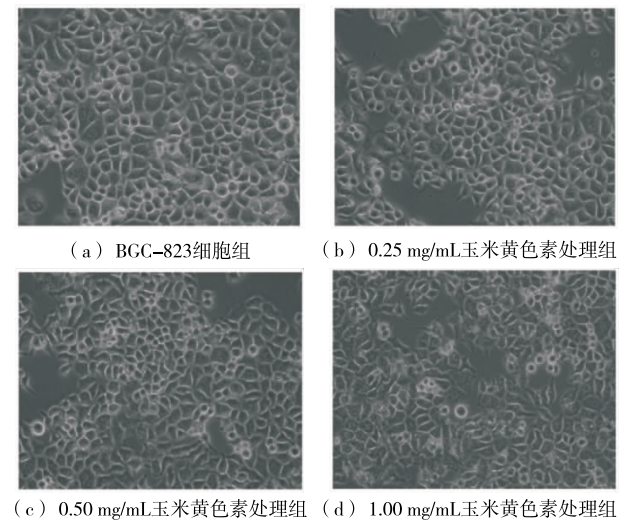


图 6 玉米黄色素对人胃癌细胞 823 细胞形态学的影响
Figure 6 Effect of maize yellow pigment on 823 cells

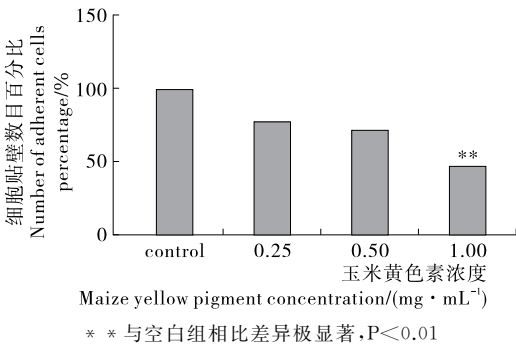


图 7 玉米黄色素对人胃癌细胞 823 细胞的抑制作用
Figure 7 Inhibitory effect of maize yellow pigment on 823 cells

缘模糊,细胞折光性减弱,与玉米黄色素处理组细胞形态相似。

2.8 玉米黄色素对人胃癌细胞增值情况的影响

由图 8 可知,玉米黄色素能够有效抑制 823 细胞的生长,当加入 1.00 mg/mL 玉米黄色素,细胞存活率变为 22.1%,与空白组比较差异极显著,并且随玉米黄色素剂量的升高,对细胞抑制效果增强,呈现剂量效应关系。李晓伶等^[9]研究表明,当玉米黄色素浓度为 53.21 μg/mL 时,人卵巢透明癌(ES-2)细胞抑制率达到 50%,当玉米黄色素为 62.21,61.93,98.60 μg/mL 时,对人乳腺癌细胞(MDA-MB-231)、人肺癌细胞(A549)、前列腺癌细胞(PC-3)也具有同样的抑制效果。宋佳等^[18]试验结果表明,酒糟中玉米黄色素对宫颈癌(Hela)细胞也具有抑制作用,当浓度 20 μg/mL 时,抑制率达到 31.98%。可见玉米黄色素具有抑制癌细胞增值的作用,但对不同癌细胞的抑制情况不同。

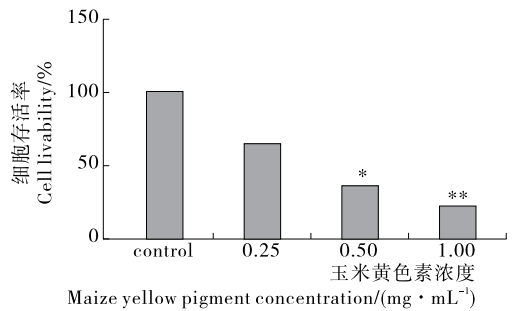


图 8 玉米黄色素对人胃癌 823 细胞存活率的影响
Figure 8 Effect of maize yellow pigment on viability of 823 cells

3 结论

本试验通过对酶活力、超声功率、酶解温度 3 个因素的探究,建立了影响玉米黄色素得率的二次多项数学模型,优化得出玉米黄色素超声辅助酶法提取的最佳工艺条件为:酶活力 10 000 U/g,超声功率 400 W,酶解温度 35 ℃;最佳条件下的得率为 (72.64±0.42) μg/g。通过形态学观察及 MTT 细胞活力检测表明玉米黄色素对人胃癌细胞具有一定损伤作用。通过试验表明超声辅助酶法制备玉米黄色素是

一种有效的方法,制备的玉米黄色素具有一定抗癌活性,但其确切抗胃癌机制还有待进一步研究。

参考文献

[1] 赵锦. 气候变化背景下我国玉米产量潜力及提升空间研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 1-8.

[2] SITHITRAI K, KETTHAISONG D, LERTRAT K, et al. Bioactive, antioxidant and enzyme activity changes in frozen, cooked, mini, super-sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata* ‘Nault-hong’)[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 44(12): 1-9.

[3] NWACHUKWU I D, UDENIGWE C C , ALUKO R E, et al. Lutein and zeaxanthin: Production technology, bioavailability, mechanisms of action, visual function, and health claim status [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 49 (3): 74-84.

[4] PRADO-CABRERO A, BEATTY S, STACK J, et al. Quantification of zeaxanthin stereoisomers and lutein in trout flesh using chiral high-performance liquid chromatography-diode array detection[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2016, 50 (7): 19-22.

[5] 袁晓晴, 刘红梅, 王德静, 等. 超声波辅助乙醇提取玉米黄色素的工艺研究[J]. *中国食品添加剂*, 2015(5): 132-136.

[6] 周芳, 郝红英. 玉米黄色素提取工艺研究进展[J]. *广东化工*, 2014, 41(21): 105-106.

[7] 李晓玲, 王世清, 王文亮, 等. 大孔树脂纯化脂溶性玉米黄色素

[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(9): 164-169.

[8] 黄新辉, 李跟深, 马淑惠, 等. 玉米黄色素的稳定性研究[J]. *化学与生物工程*, 2006, 23(6): 38-40.

[9] 李晓玲, 王世清, 徐同成, 等. 玉米黄色素对人卵巢透明癌细胞 ES-2 侵袭、迁移、凋亡及周期的影响[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(2): 1-5.

[10] 朱洪梅. 玉米黄色素提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(7): 15-20.

[11] 孙震, 苏宇杰, 姚惠源. 玉米蛋白粉中黄体素、玉米黄素对乳腺癌细胞增殖的影响[J]. *食品与机械*, 2005, 21(2): 6-11.

[12] 刘军海, 王俊宏, 代红灵. 玉米黄色素提取工艺的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(11): 109-111.

[13] 李晓玲, 陈相艳, 王文亮, 等. 超微粉碎与微波辅助酶法提取玉米黄色素工艺优化[J]. *食品科技*, 2014, 39(2): 228-233.

[14] 刘剑利, 刘晓, 曹向宇, 等. 稠李花色苷的纯化及体外抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 5-10.

[15] 刘晓, 曹向宇, 李其久, 等. 稠李花色苷酶法制备及对 H₂O₂诱导大鼠胰岛瘤细胞损伤的保护作用[J]. *食品科学*, 2016, 37 (6): 7-12.

[16] 李孚杰, 潘丹贞, 张丛兰, 等. 纤维素酶法提取板栗壳色素的工艺条件优化[J]. *食品科学*, 2012, 33(2): 149-153.

[17] 陆雪莹, 李艳红, 肖向文, 等. 木犀草素抑制人胃癌 BGC-823 细胞增殖作用的研究[J]. *现代中西医结合杂志*, 2012, 21(3): 246-249.

[18] 宋佳, 姜福佳, 田野, 等. 超声波法优化酒糟中玉米黄色素的提取工艺及其抗肿瘤的研究[J]. *酿酒*, 2009, 36(2): 65-68.

(上接第 138 页)

时晾晒极易发热霉变)。10 月份气温较高脱粒玉米通过晾晒水分可以降到 15% 以下,11 月份气温下降晾晒困难,此时玉米穗水分已降到 20% 以下,可以脱粒入库机械通风干燥。

通风干燥期间,要根据当地粮情和储粮生态,灵活调整通风干燥方案,才能取得良好的干燥效果且节约成本。

3 结语

中国国标^[4]和行业标准^[5-6]对高水分粮食的就仓干燥提供了原则性的技术操作方法规范,但机械套用上述规范进行操作不能很好地解决粮食过度干燥和粮堆各部分水分梯度较大的问题,而且干燥成本较高。本试验在控制入仓粮食基本水分在合理的范围内、适时通风干燥,准确把握各干燥点水分、精准分析干燥时间并进行倒仓平衡水分等方法,使干燥成本控制在较低的水平,比机械干燥节约成本约 50%,实现了水分平衡和安全储粮;根据粮情能够推算所需通风干燥时间,降低了过度干燥发生的概率,是一种切实可行的粮食常规通风就仓干燥方法。后续可通过玉米入库前期降水^[7]、入仓后分析仓内粮堆温度场分布规律^[8],优化通风路径分布,结合其他热泵技术对此技术方法进一步完善,预期可以获得更好的就仓干燥效果^[9-10],在充分保障储粮质量的同时,节能降耗,提高干燥效率。

参考文献

[1] 毕文雅, 张来林, 郭桂霞. 我国粮食干燥的现状与发展方向[J]. *粮食与饲料工业*, 2016, 12(7): 12-15.

[2] 张德欣, 杨庆询, 刘艳芳, 等. 高水分地产玉米就仓干燥实验[J]. *粮食储藏*, 2016, 45(2): 1-5.

[3] 蒋国斌, 梅剑锋, 史东斌. 偏高水分玉米就仓干燥节能通风试验[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2007, 22(5): 27-29.

[4] 全国粮油标准化技术委员会. GB/T 26880—2011 粮食储藏 就仓干燥技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011:1-4.

[5] 国家粮食局. LS/T 1211—2008 粮油储藏技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008:13-23.

[6] 国家粮食局. LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-15,28-29.

[7] 董殿文, 董梅, 高树成, 等. 农户玉米穗储藏特性及其储藏损失的研究[J], *中国粮油学报*, 2014, 29(3): 74-78.

[8] 王敏, 余跃进. 低温储粮应用中的粮堆温度场模拟分析[J]. *食品与机械*, 2013, 29(5): 194-197, 212.

[9] 王鑫, 崔立军, 潘治, 等. 利用高温低湿空气对高水分玉米进行就仓干燥[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2013, 29(6): 14-16.

[10] 张静, 李占勇, 董鹏飞, 等. 玉米红外低温真空干燥试验[J]. *食品与机械*, 2012, 28(2): 187-189.