

# 板栗淀粉的提取工艺优化及其性质分析

张增江, 王竹, 朱俊超, 陈玲, 李晓玺, 郑波\*

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 华南理工大学淀粉与植物蛋白深加工教育部工程研究中心, 广东广州 510640)

**摘要:** 该研究以提高板栗淀粉提取率为设计目标, 筛选了三种提取方法并对提取参数进行响应面优化获得最佳提取工艺, 进一步利用该工艺对不同品种板栗淀粉进行提取并对其性质进行了比较分析研究。结果表明, 酶法(碱性蛋白酶)较表面活性剂法和碱法两种提取方法能更高效地提取板栗淀粉, 且最佳提取工艺条件分别为酶解时间 100 min, 酶用量 0.22%, 酶解温度 43 °C, 获得的最佳理论提取率和实际提取率分别为 96.73%和 96.61%, 且淀粉纯度可高达 99.28%。对三个品种板栗淀粉的性质进行比较结果表明, 东岳早丰的溶解度(2.13%)最大, 膨胀度(11.52%)最小而大峰的溶解度(0.67%)最小但是膨胀度(13.44%)最大。在相同的冻融次数下, 大峰的冻融稳定性(67.33%)最差, 而油榛和东岳早丰的稳定性一致(64.52%和 64.23%)且较好。东岳早丰、大峰和油榛三种板栗淀粉的抗消化淀粉(RS)分别为 60.88%、74.44%和 60.70%, 其中大峰抗消化淀粉含量最高。该研究可为板栗淀粉的高值化应用提供基础数据和理论依据。

**关键词:** 板栗淀粉; 提取工艺; 性质; 品种

**文章篇号:** 1673-9078(2022)07-225-231

**DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.0986

## Optimization of Extraction Process for Chestnut Starches and Analysis of Their Properties

ZHANG Zengjiang, WANG Zhu, ZHU Junchao, CHEN Ling, LI Xiaoxi, ZHENG Bo\*

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Ministry of Education Engineering Research Center of Starch & Protein Processing, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This research aimed to improve the extraction rate of starch from chestnut. Three extraction methods were screened, and the extraction parameters were optimized by response surface methodology to obtain the optimal extraction process. Furthermore, starches from different chestnut varieties were extracted by the optimal process, and their properties were compared and analyzed. The results showed that the enzymatic method (alcalase) could extract chestnut starch more efficiently than the surfactant method and the alkali method. The optimal extraction conditions were as follows: enzymatic hydrolysis time, 100 min; enzyme dosage, 0.22%; enzymatic hydrolysis temperature, 43 °C. The optimal theoretical extraction rate and actual extraction rate were 96.73% and 96.61%, respectively, and the purity of starch was 99.28%. The comparison of the properties of the starches from the three chestnut varieties showed that the starch of Dongyuezaofeng had the highest solubility (2.13%) and the lowest swelling degree (11.52%), whilst that of Dafeng had the lowest solubility (0.67%) but the highest swelling degree (13.44%). After the same freeze-thaw cycles, the freeze-thaw stability of Dafeng starch was the worst (67.33%), whilst Youzhen and Dongyuezaofeng starches had the same and better stability (64.52% and 64.23%). The resistant starch contents of Dongyuezaofeng, Dafeng, and Youzhen starches were 60.88%, 74.44% and 60.70%, respectively, among which Dafeng starch had the highest resistant starch content

引文格式:

张增江,王竹,朱俊超,等.板栗淀粉的提取工艺优化及其性质分析[J].现代食品科技,2022,38(7):225-231,+18

ZHANG Zengjiang, WANG Zhu, ZHU Junchao, et al. Optimization of extraction process for chestnut starches and analysis of their properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 225-231, +18

收稿日期: 2021-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1002300)

作者简介: 张增江(1997-),男,博士研究生,研究方向:淀粉功能化修饰与营养调控, E-mail: 365375262@qq.com

通讯作者: 郑波(1993-),男,博士后,研究方向:淀粉功能化修饰与营养调控, E-mail: bzhen@scut.edu.cn

(74.44%)。This research can provide basic data and a theoretical basis for the high-value application of chestnut starch.

**Key words:** chestnut; starch; extraction process; properties; variety

板栗 (*Castanea mollissima* BL.) 隶属于壳斗科, 是我国重要的经济林果作物, 在中国有六千多年的栽培历史<sup>[1,2]</sup>。板栗果实含淀粉 35%~50%、蛋白质 7%~10%、脂肪 4%~5%、总糖 10%~15%以及多种维生素和磷、钾、钙、镁、铁等微量元素<sup>[3]</sup>, 具有预防高血压、骨质疏松和延缓衰老等功效<sup>[4,5]</sup>。虽然板栗营养成分丰富, 但由于加工技术较为落后, 高附加值产品少, 因此对其保健功能仍有很大的开发利用空间<sup>[6,7]</sup>。近年来, 随着板栗产量的逐年增加以及板栗精深加工技术的发展, 加工后的板栗制品容易被人体消化吸收导致血糖急剧上升, 同时板栗制品易老化导致货架期较短的缺点逐渐暴露。淀粉作为板栗仁的主要营养物质, 极大地影响着板栗相关制品的品质和应用范围。可见, 调控淀粉性质和消化性能与板栗及其制品的加工品质与营养特性关系密切, 研究淀粉的性质如膨胀溶解性、热性质、糊性质、回生可为板栗及板栗淀粉性质的深入研究奠定基础。如何高效从板栗中提取淀粉并对其性质进行研究, 有助于提高板栗及其相关制品的附加值和开发利用空间, 为后续板栗相关制品的开发与创制提供高效方法。

目前淀粉的提取方法主要有碱法、酶法和表面活性剂法等。碱法和酶法是利用碱或酶的作用将与淀粉结合的蛋白质和纤维素等成分水解, 进而释放淀粉, 提高淀粉的得率。研究表明碱法提取淀粉会降低淀粉中直链淀粉的分子量, 并增加淀粉的吸水性和膨胀度<sup>[8]</sup>。表面活性剂法是利用烷基苯磺酸钠等表面活性剂与蛋白质结合, 使得蛋白质变性形成络合物从而与淀粉分离, 达到提取淀粉的目的<sup>[9]</sup>。然而目前利用三种方法对板栗淀粉进行提取的对比研究暂未见报道。板栗熟化后口感细腻, 甘甜且有风味, 受到广泛大众的喜爱, 但熟化后的板栗具有更高含量的快消化淀粉, 容易被人体消化, 引起高血糖应答, 不利于人体的健康。Pizzoferrato 等<sup>[10]</sup>对欧洲板栗分析中发现熟化的板栗淀粉中具有较高的快消化淀粉 (RDS), 抗性淀粉 (RS) 含量却很低。Zhang 等<sup>[11]</sup>对九个品种的板栗淀粉进行分析得出了类似的结果, 糊化之后的板栗淀粉 RDS 含量很高, 达到 79.60%~89.50%, 而 RS 含量仅为 7.10%~17.40%。由此可知, 深入了解板栗淀粉的性质, 可为拓宽板栗淀粉的应用以及推动我国板栗产业的发展提供基础数据。

本研究通过酶法、表面活性剂法和碱法三种提取方法对板栗淀粉进行提取, 获得适合板栗淀粉的提取

方法并对提取工艺进行优化, 以期建立板栗淀粉的高效提取方法。进一步通过最佳提取工艺方法提取三个品种的板栗淀粉并对其性质进行对比研究。研究结果可为板栗淀粉的高值利用和板栗产业的发展提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

油榛板栗、东岳早丰板栗和大峰板栗, 食品级; 碱性蛋白酶 (30 U/mg), 食品级, 河南万邦实业有限公司; 氢氧化钠, 天津科密欧化学试剂有限公司; 烷基苯磺酸钠、硫酸钾, 天津市致远化学试剂有限公司; 石油醚, 天津市富宇精细化工有限公司; 硫酸, 北京化工厂; 硼酸、盐酸, 广州化学试剂厂; 硫酸铜, 天津市化工三厂有限公司; 甲基红、溴甲酚绿, 天津市天新精细化工开发中心。所有试剂均为国产分析纯。

JYL-Y15 破壁打浆机, 九阳股份有限公司; DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器, 巩义市予华仪器有限责任公司; TDZ5-WS 离心机, 湘仪离心机有限公司; HH-1 数显恒温水浴锅, 常州澳华仪器有限公司; 8400 凯氏定氮仪, 上海瑞玢国际贸易有限公司; SOI406 索氏提取仪, 济南海能仪器股份有限公司; DHS20-1 快速水分测定仪, 德国 Sartorius 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 淀粉提取工艺的筛选

本研究以油榛板栗为例进行提取工艺的筛选, 参照孔露等<sup>[12]</sup>的方法将新鲜板栗去壳后, 称取 300 g 果实研磨粉碎, 并通过运用索氏抽提法使用石油醚抽提 6 h 以除去脂肪, 将脱脂后的板栗淀粉按照 1:4 (g/mL) 的料液比加入蒸馏水。

a) 碱法: 加入 3 g NaOH, 搅拌均匀后放置在冰箱中冷藏 24 h。

b) 酶法: 加入 0.6 g NaOH, 搅拌均匀后放置在 40 °C 恒温水浴锅中恒温 30 min 后, 加入 0.9 g 碱性蛋白酶, 恒温水浴锅中 40 °C 酶解 2 h。

c) 表面活性剂法: 加入 0.6 g 烷基苯磺酸钠固体, 搅拌均匀后放置在冰箱中冷藏 24 h。

将料液过 4 层纱布过滤, 收集滤液, 以转速 4000 r/min 离心 5 min, 用勺子去除上层杂质, 加 250 mL 去离子水水洗并离心, 重复洗涤 3 次。加无水乙醇 250

mL 醇洗并离心 (4000 r/min) 两次, 再用无水乙醇抽滤后, 烘箱中 50 °C 干燥 20 h, 装袋保存。

## 1.2.2 酶法提取淀粉的单因素实验

### 1.2.2.1 不同酶解时间对淀粉提取率的影响

参照孔露等<sup>[12]</sup>的方法, 以 60、90、120 和 150 min 酶解时间为变量, 研究不同酶解时间对淀粉提取率的影响。

### 1.2.2.2 不同酶用量对淀粉提取率的影响

参照孔露等<sup>[12]</sup>的方法, 以 0.10%、0.20%、0.40%、0.60% 和 0.80% 酶用量为变量, 研究不同酶用量对淀粉提取率的影响。

### 1.2.2.3 不同酶解温度对淀粉提取率的影响

参照孔露等<sup>[12]</sup>的方法, 以 30、40、50 和 60 °C 的酶解温度为变量, 研究不同酶解温度对淀粉提取率的影响。

## 1.2.3 酶法提取板栗淀粉的响应面实验

依据单因素实验结果及响应面实验设计基本原理筛选出合适的因素水平范围, 并以酶解时间、酶用量和酶解温度为变量, 淀粉提取率为响应值, 探究不同实验因素对板栗淀粉提取率的影响, 确立酶法提取板栗淀粉的最佳实验条件, 并通过响应面结果进行验证确立最佳实验条件。响应面实验因素水平设置如表 1 所示。

表 1 响应面实验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface methodology

水平	因素		
	X1 酶解时间/min	X2 酶用量/% (占板栗质量分数)	X3 温度/°C
-1	60	0.10	40
0	90	0.20	50
1	120	0.30	60

## 1.2.4 试验指标测定方法

### 1.2.4.1 提取率计算

按公式 1 对板栗淀粉提取率进行计算

$$G = \frac{M_i}{M_0 C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中:

G——淀粉提取率;

$M_i$ ——淀粉质量;

$M_0$ ——板栗质量;

$C_0$ ——板栗中淀粉含量。

### 1.2.4.2 水分含量测定

取约 1 g 淀粉置于铝制托盘中铺平, 通过 105 °C 加热的方法使用快速水分含量测定仪测定样品水分含量。

### 1.2.4.3 脂肪含量测定

根据 GB 5009.6-2016 和楚屹然等<sup>[13]</sup>方法稍加修改, 对铝杯进行高温干燥恒重处理, 准确称量其质量, 精确到 0.01 mg。准确称取均匀样品 2~5 g (精确到 0.01 mg), 装入滤纸筒内, 折叠好滤纸筒转入滤纸筒架, 在铝杯内加入 50 mL 石油醚进行加热抽提 5 h。蒸去铝杯中剩余石油醚, 高温干燥至恒重后准确称量其质量, 精确到 0.01 mg。

### 1.2.4.4 蛋白质含量测定

根据 GB 5009.5-2016 方法<sup>[14]</sup>, 准确称取试样 2 g (精确到 0.01 mg), 带滤纸包移入消化管中。往其中加入 0.20 g 硫酸铜、6 g 硫酸钾和 10 mL 浓硫酸。将消化管移入消化炉消化 4 h, 消化完成后继续加热 0.5 h, 取下放冷。使用自动凯氏定氮仪对样品进行蒸馏, 取蒸馏液体使用 0.01 mol/L 盐酸进行滴定, 计算蛋白质含量。

### 1.2.4.5 理化性质的测定

参照李梁等<sup>[15]</sup>的方法, 对板栗淀粉的溶解度、膨胀度和冻融稳定性进行测定。准确称取一定量的淀粉, 配置成质量分数 5% 的淀粉乳, 在 50 °C 下水浴加热并搅拌 20 min, 再以 4000 r/min 离心 20 min, 分离上清液和下层沉淀物, 将上清液烘干至恒重, 称重为  $m_1$ , 按式(2)计算其溶解度 S。离心管中沉淀物质量  $m_2$ , 按式(3)计算其膨胀度 B。

$$S = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (2)$$

$$B = \frac{m_2}{m \times (1 - S)} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$m_1$ ——上层清液烘干恒重后的质量, g;

$m$ ——淀粉的干重, g;

$m_2$ ——离心后下层沉淀物的质量, g。

将质量分数 3% 的淀粉乳放置在沸水浴中加热糊化并持续保温 15 min, 使淀粉糊保持体积不变, 再将其冷却至室温, 放置在冰箱中冷冻 24 h 后取出, 在自然条件下解冻, 再放置在冰箱中冷冻, 重复上述操作 1 次, 解冻后, 以 4000 r/min 离心 15 min (若无水析出, 继续反复冻融, 直到有水析出为止), 称取沉淀物质量, 按式(4)计算析水率。

$$\text{析水率} = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$m_3$ ——淀粉糊的质量, g;

$m_4$ ——沉淀物的质量, g。

### 1.2.4.6 板栗淀粉消化性能的测定

参照刘坤等<sup>[16]</sup>的方法, 通过使用 5 mL 猪胰  $\alpha$ -淀粉酶和葡萄糖苷酶混合酶对 1 g 干基淀粉进行酶解, 在充分反应 20 min 和 120 min 后分取 0.5 mL 反应液于 20 mL 70% 的乙醇水溶液中进行灭酶, 并使用 GOPOD 试剂盒测定酶解液中葡萄糖含量以计算淀粉的消化性能。

$$Glucose = \frac{A_t \times V_t \times C \times D}{A_s \times W_t} \times 100 \quad (5)$$

式中:

$A_t$ —测试溶液的吸光值;

$V_t$ —测试溶液的总容积, mL;

$C$ —标准浓度, mg 葡萄糖/mL;

$D$ —稀释倍数;

$A_s$ —标准葡萄糖的吸光值;

$W_t$ —样品的质量, g。

$$RDS=(G20-FG) \times 0.9 \quad (6)$$

$$SDS=(G120-G20) \times 0.9 \quad (7)$$

$$RS=TS-(RDS+SDS)=TS-(G120-FG) \times 0.9 \quad (8)$$

式中:

$G20$ 、 $G120$ —酶水解 20 min、120 min 后的总葡萄糖含量;

$FG$ —酶解处理前样品中葡萄糖含量 (以 0 计);

$TS$ —总淀粉质量, g。

### 1.3 数据处理

本研究采用 Excel 2019 软件建立数据库, 所有数据均用  $\bar{X} \pm SD$  表示, 采用 SPSS 22 对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 统计分析, 组间比较采用 Duncan 法,  $p < 0.05$  为差异有统计学意义, 采用 Design-Expert 软件进行响应面设计。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同提取方法的板栗淀粉提取率

表 2 不同提取方法的板栗淀粉提取率

Table 2 Crude extraction rate of chestnut starch by different extraction methods

板栗品种	油榛		
提取方法	碱法	酶法	表面活性剂法
提取率/%	64.27±1.64 <sup>a</sup>	92.11±1.58 <sup>a</sup>	78.45±1.37 <sup>b</sup>

由表 2 可以得出, 对同一品种板栗, 酶法的提取率为 92.11%, 远高于碱法 (64.27%) 和表面活性剂法 (78.45%), 可以推断碱性蛋白酶在一定条件下对于板栗中蛋白的分解作用高于碱和表面活性剂对板栗中蛋白的分离作用, 能较为高效地提取板栗中的淀粉,

因此选取酶法进行单因素和响应面实验进行优化。

### 2.2 酶法提取淀粉的单因素实验结果

#### 2.2.1 不同酶解时间对板栗淀粉提取率的影响

由图 1a 可以看出, 在酶解条件为板栗 100 g, 料液比 1:4 (g/mL)、酶用量 0.40%、酶解温度 40 °C 时, 当酶解时间处于 90 min 附近时, 提取率最大, 当酶解时间超过 90 min 后, 板栗淀粉提取率略有下降。这可能是因为淀粉颗粒中的结合蛋白在 90 min 内被蛋白酶完全水解, 由于氢氧化钠的存在会对淀粉起到微弱的降解作用, 延长反应时间致使淀粉含量下降, 淀粉提取率有所降低<sup>[9]</sup>。

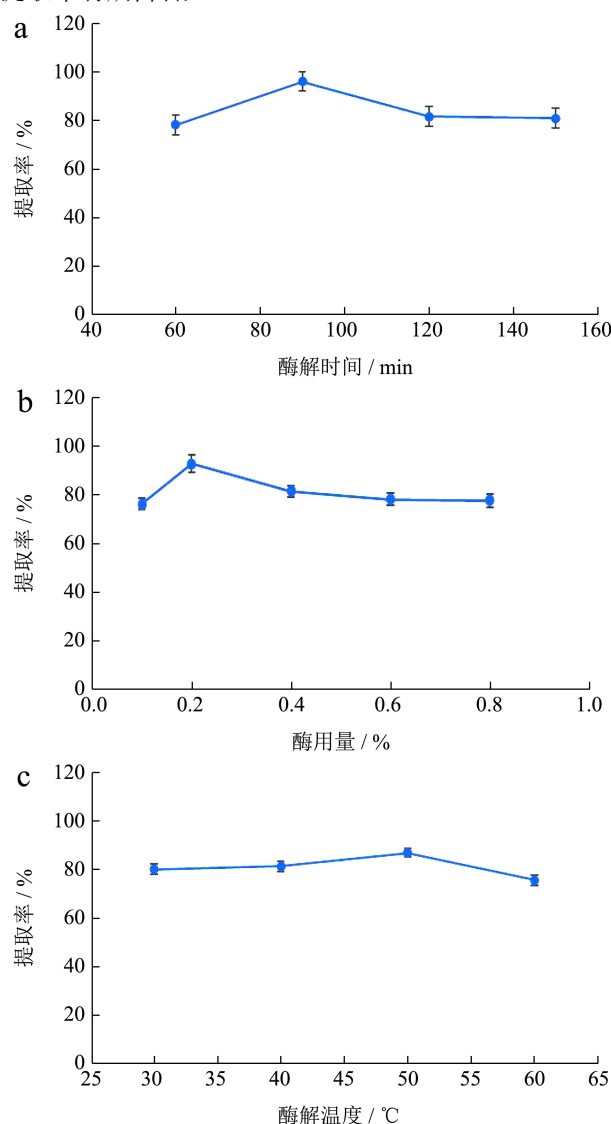


图 1 酶解时间 (a)、酶用量 (b)、酶解温度 (c) 对淀粉提取率的影响

Fig.1 The effect of enzymolysis time (a), enzyme dosage (b) and enzymolysis temperature (c) on starch extraction rate

#### 2.2.2 酶用量对于板栗淀粉得率的影响

图 1b 可以看出, 在酶解条件为板栗 100 g, 料液

比 1:4 (g/mL)、酶解温度 50 °C、酶解时间 120 min 时,当酶用量在 0.20%附近时,提取率最高。在一定范围内,提取率随着酶用量增多而增大,但超过 0.20%后,提取率下降并趋于平缓,这可能是由于当酶用量低于最佳值时,体系中酶含量逐渐升高可促进底物与酶反应位点的有效结合,进而使得提取率升高。但酶用量超过一定量之后,酶之间相互竞争底物,同时与酶的底物结构相同的分子占据活性中心,对蛋白酶产生一定的抑制作用<sup>[17]</sup>。因此最佳的酶用量在 0.2%附近。

### 2.2.3 酶解温度对于板栗淀粉得率的影响

由图 1c 可知,在酶解条件为板栗 100 g,料液比 1:4 (g/mL)、酶用量 0.40%、酶解时间 120 min 时,当酶解温度在 50 °C附近时,提取率最大,在温度从 30 °C升到 50 °C时,提取率不断升高,超过 50 °C后提取率开始下降。这是由于本研究使用的蛋白酶最适温度为 45~55 °C,在最适温度条件下酶活性最高,当实际温度与最适温度偏离越远时,活性越低。因此提取率在最适温度附近最高,偏离最适温度后酶活不断降低<sup>[9]</sup>。

## 2.3 酶法提取板栗淀粉的响应面实验结果

### 2.3.1 Box-Behnken 试验回归模型的建立及显著性检验

表 3 响应面实验设计与结果

Table 3 Experimental design and results of response surface methodology

实验号	X1	X2	X3	Y 提取率/%
1	90	0.30	40	84.81
2	60	0.20	40	84.64
3	60	0.10	50	81.48
4	90	0.20	50	89.91
5	90	0.20	50	84.95
6	90	0.10	40	95.66
7	120	0.10	50	72.30
8	90	0.20	50	93.16
9	120	0.20	60	35.03
10	60	0.30	50	87.98
11	90	0.10	60	58.12
12	90	0.20	50	87.27
13	90	0.30	60	49.04
14	120	0.20	40	92.98
15	60	0.20	60	64.23
16	120	0.30	50	89.20
17	90	0.20	50	96.62

响应面实验以单因素实验为基础,以淀粉提取率

为响应值,利用 Design-Expert 软件优化板栗淀粉提取工艺,固定料液比为 1:4 (g/mL),通过 17 次实验得到板栗淀粉提取率,响应面设计及结果见表 3。

### 2.3.2 回归模型的有效性及其显著性分析

利用 Design-Expert 8.0 软件对表 3 数据进行多元回归拟合,获得酶解温度、酶解时间、酶用量与板栗淀粉提取率之间的二次多项回归方程:

$$Y = -381.96402X_1 + 2.30351X_2 + 3.39128X_3 + 16.82852X_1X_2 - 0.031279X_1X_3 + 0.43900X_2X_3 - 5.73871 \times 10^{-3}X_1^2 - 247.59600X_2^2 - 0.15997X_3^2$$

该模型的方差分析结果见表 4。

表 4 回归方程的方差分析

Table 4 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
X <sub>1</sub>	103.67	1	103.67	2.10	0.1901
X <sub>2</sub>	1.50	1	1.50	0.03	0.8663
X <sub>3</sub>	2875.64	1	2875.64	58.38	0.0001
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	27.06	1	27.06	0.55	0.4827
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	352.21	1	352.21	7.15	0.0318
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.77	1	0.77	0.02	0.9040
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	112.32	1	112.32	2.28	0.1748
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	25.81	1	25.81	0.52	0.4926
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1077.51	1	1077.51	21.88	0.0023
回归模型	4647.19	9	516.35	10.48	0.0027
残差	344.78	7	49.25		
失拟	258.69	3	86.23	4.01	0.1067
纯误差	86.09	4	21.52		
总误差	4991.97	16			
			模型 R <sup>2</sup> =0.93	模型 R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub> =0.84	

注:  $p < 0.01$  表示极显著;  $0.01 < p < 0.05$  表示显著;  $p > 0.05$  表示不显著。

由表 4 可知,淀粉提取率整体模型的  $F=10.48$ ,模型回归值  $p < 0.01$ ,表明该回归模型极显著,通过对 X<sub>1</sub> (酶解时间)、X<sub>2</sub> (酶用量)、X<sub>3</sub> (酶解温度)的 F 值的比较,可知三因素对淀粉提取率的影响从大到小依次为: X<sub>3</sub> (酶解温度) > X<sub>1</sub> (酶解时间) > X<sub>2</sub> (酶用量)。失拟项可以用来表示模型与试验的拟合程度,表现出二者的差异程度。本试验中,失拟项  $F=4.01$ , $p=0.1067$ ,失拟项不显著,表示该模型对于试验有良好的一致性<sup>[18]</sup>。模型中调整系数  $R^2_{Adj}=0.84$ ,说明 84% 的响应值的变化可以通过该模型解释,相关系数  $R^2=0.93$ ,表明模型与试验的拟合度较好,可以用来分析预测板栗淀粉的提取率。

### 2.3.3 响应面分析

表5 板栗淀粉纯度及提取率

Table 5 The starch extraction rate of different chestnuts extracted under the optimal conditions

种类	水分/%	脂肪/%	蛋白质/%	纯淀粉/%	提取率/%	淀粉纯度/%
板栗粗淀粉	9.86±0.35	0.21±0.08	0.31±0.09	89.62±0.61	96.61±1.52	99.28±0.14

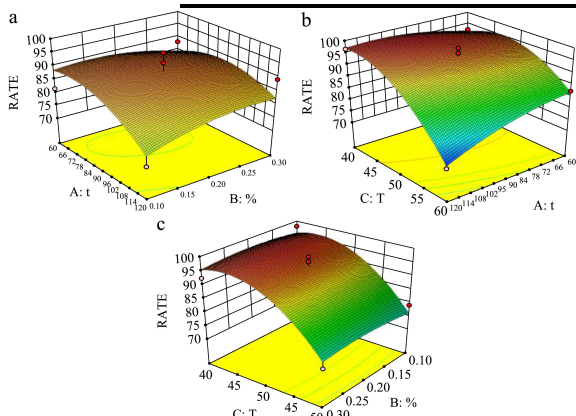


图2 酶解时间和酶用量 (a)、酶解温度和酶解时间 (b)、酶解温度和酶用量 (c) 交互对淀粉提取率的影响

Fig.2 The effect of the interaction of enzymatic hydrolysis time and enzyme dosage (a), enzymolysis temperature and enzymolysis time (b) and enzymolysis temperature and enzyme dosage (c) on the extraction rate of starch

为进一步分析酶添加量、酶解时间和酶解温度对于板栗淀粉提取率的影响，将三因素中的一个固定为0水平，对其余两个因素进行交互作用影响的作图，可得到其相互作用的响应面图，如图2a、2b和2c所示。响应面图可以直观地反映出三因素交互作用对于淀粉提取率的影响，反映出自变量交互效应的强度。

由软件计算得到板栗淀粉提取率最高的提取条件为酶解时间 99.65 min，酶用量 0.22%，酶解温度 43.16 °C，提取率为 96.73%，结合实际应用，确定板栗淀粉的最佳提取条件为酶解时间 100 min，酶用量 0.22%，酶解温度 43 °C。

### 2.3.4 响应面实验结果验证

以响应面优化后得到的实验条件对板栗淀粉进行提取以验证模型的有效性，结果如表5所示。所提取的板栗粗淀粉中水分、脂肪、蛋白质及纯淀粉含量分别为 9.86%、0.21%、0.31%和 89.62%。1 g 干基粗淀粉中纯淀粉的含量用淀粉纯度表示。本研究中淀粉纯度为 99.28%，淀粉的提取率为 96.61%，与响应面模型预测结果 96.73%仅有 0.12%的偏差。这说明响应面模型具有高度可靠性，所优化得到的提取条件能高效地提取板栗中的淀粉。谭宏渊等<sup>[19]</sup>利用微波辅助提取板栗淀粉，其最高提取率为 14.96%，根据其提取率计算方法，本文使用的提取方法提取率能达到 19.71%，说明本文优化的板栗淀粉提取方法更加高效。

### 2.3.5 板栗淀粉溶解度、膨胀度和冻融稳定性

### 评价

以优化后的最佳提取条件分别提取另外两个品种的板栗（东岳早丰和大峰）淀粉并对三种板栗淀粉的溶解度、膨胀度、冻融稳定性进行测试，结果表6所示。淀粉的溶解度和膨胀度分别指淀粉在水中溶解能力的大小和淀粉悬浮液在特定加热条件下的水合能力与在一定条件下离心后的持水能力。不同品种板栗淀粉的溶解度和膨胀度有一定的差异，东岳早丰的溶解度最大（2.13%），但是膨胀度最小（11.52%）；大峰的溶解度最小（0.67%）但是膨胀度最大（13.44%），油榛则都居中。冻融稳定性反映了淀粉糊冻融后的脱水程度，脱水率越低，冻融稳定性越好，淀粉越难老化。在相同的冻融次数下，大峰的析水率最大（67.33%），其冻融稳定性最差，而油榛和东岳早丰的析水率相近（64.52%和 64.23%），稳定性一致且较好。与李梁等<sup>[15]</sup>的实验结果相比，马铃薯淀粉的溶解度（18.41%）和膨胀度（22.34%）均高于板栗淀粉，而冻融稳定性（61.55%）则低于板栗淀粉。

表6 板栗淀粉的溶解度、膨胀度和冻融稳定性

Table 6 Solubility, swelling degree and freeze-thaw stability of chestnut starch

性质	溶解度/%	膨胀度/%	冻融次数	析水率/%
油榛	1.05±0.18 <sup>b</sup>	12.35±0.33 <sup>b</sup>	2	64.52±0.97 <sup>b</sup>
东岳早丰	2.13±0.12 <sup>a</sup>	11.52±0.49 <sup>c</sup>	2	64.23±1.44 <sup>b</sup>
大峰	0.67±0.20 <sup>c</sup>	13.44±0.35 <sup>a</sup>	2	67.33±1.12 <sup>a</sup>

### 2.3.6 板栗淀粉消化性能

表7 板栗淀粉的消化特性

Table 7 Digestive characteristics of chestnut starch

板栗品种	RDS/%	SDS/%	RS/%
东岳早丰	10.52±0.18 <sup>b</sup>	28.60±0.38 <sup>a</sup>	60.88±0.31 <sup>b</sup>
大峰	7.40±0.28 <sup>c</sup>	18.16±0.82 <sup>c</sup>	74.44±0.88 <sup>a</sup>
油榛	11.54±0.02 <sup>a</sup>	27.75±0.22 <sup>b</sup>	60.70±0.20 <sup>b</sup>

淀粉的消化性能体现了淀粉颗粒结构对淀粉酶的敏感性。淀粉颗粒表面的致密程度、有无孔洞、多尺度有序结构对淀粉酶作用位点的屏蔽效果和对淀粉酶的抵御作用决定了淀粉颗粒的消化性能。由表中可以看到三种板栗淀粉中抗消化淀粉含量均占比最高，占60%以上。其中大峰抗消化淀粉含量最高，高达74.44%，这可能与淀粉内部具有相对较高的有序结构有关<sup>[20]</sup>。同时，东岳早丰和油榛慢消化淀粉（SDS）含量占25%以上，高于大峰。与唐煜括<sup>[21]</sup>的研究结果



相比,马铃薯淀粉的RDS和SDS含量(分别为31.62%和44.43%)均高于板栗淀粉,而RS含量(23.95%)则远低于板栗淀粉。这说明板栗淀粉多尺度结构对酶的抵抗性强于马铃薯淀粉。由此可知,通过对三个品种板栗淀粉的消化性能进行对比分析可见,大峰品种的板栗抗消化性能最高,更适合用于抗消化食品的开发与利用。

### 3 结论

本研究通过对比三种提取方法对板栗淀粉进行提取发现酶法相对表面活性剂法和碱法能更加高效提取板栗淀粉,且最佳工艺条件为酶解时间100 min,酶用量0.22%,酶解温度43℃,最佳理论提取率和实际提取率分别达到96.73%和96.61%,所提取的淀粉纯度达到99.42%。通过对比不同品种板栗淀粉理化性质发现不同品种的板栗淀粉的理化性质存在较大差异,其中大峰板栗淀粉的抗消化淀粉含量最高,达到了74.44%,可进一步进行营养健康板栗制品的创制。该研究可为高品质高附加值的板栗淀粉及板栗深加工产品的开发和创制提供基础数据。

### 参考文献

- [1] 陈可可.不同板栗品种在迁西地区开花结实规律研究[D].北京:北京林业大学,2018  
CHEN Keke. Study on flowering and fruiting rules of different chestnut varieties in Qianxi area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018
- [2] 陈良珂.板栗坚果淀粉积累规律及淀粉分支酶的基因克隆与分析[D].北京:北京农学院,2017  
CHEN Liangke. Starch accumulation and gene cloning and analysis of starch branching enzymes in chestnut nuts [D]. Beijing: Beijing Agricultural University, 2017
- [3] ZHU Fan. Properties and food uses of chestnut flour and starch [J]. Food Bioprocess Technology, 2017, 10(7): 1173-1191
- [4] Liu W, Wang R, Li J, et al. Effects of different hydrocolloids on gelatinization and gels structure of chestnut starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120(106925): 21-32
- [5] Fang Yang, Qi Liu, Siyi Pan, et al. Chemical composition and quality traits of Chinese chestnuts (*Castanea mollissima*) produced in different ecological regions [J]. Food Bioscience, 2015, 11(21): 33-42
- [6] Littardi P, Paciulli M, Carini E, et al. Quality evaluation of chestnut flour addition on fresh pasta [J]. LWT - Food Science Technology, 2020, 126(109303): 421-434
- [7] Maria P, Massimiliano R, Antonella C, et al. Effect of chestnut flour supplementation on physico-chemical properties and oxidative stability of gluten-free biscuits during storage [J]. LWT - Food Science Technology, 2018, 98(42): 451-457
- [8] Lumdubwong N, Seib P A. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour [J]. Journal of Cereal Science, 2000, 31(1): 63-74
- [9] 杜洋,史岩,陈海华.响应面法优化高粱米淀粉的中性蛋白酶法提取工艺[J].粮食与油脂,2015,8:20-24  
DU Yang, SHI Yan, CHEN Haihua. Optimization of neutral protease extraction process of sorghum rice starch by response surface methodology [J]. Grain and Oil, 2015, 8: 20-24
- [10] Pizzoferrato L, Rotilio G, Paci M. Modification of structure and digestibility of chestnut starch upon cooking: a solid state (13)C CP MAS NMR and enzymatic degradation study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(10): 4060-4063
- [11] Zhang L, Liu T, Hu G, et al. Comparison of physicochemical properties of starches from nine Chinese chestnut varieties [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2018, 23(12): 16-27
- [12] 孔露,孔茂竹,余佳熹,等.响应面优化碱性蛋白酶法提取藜麦淀粉工艺[J].食品研究与开发,2020,41(2):108-114  
KONG Lu, KONG Maozhu, YU Jiayi, et al. Optimization of extraction process of quinoa starch by alkaline protease with response surface methodology [J]. Food Research and Development, 2020, 41(2): 108-114
- [13] 楚屹然,郭静,卢美娟.索氏抽提法测美国大豆粗脂肪含量的影响因素分析[J].现代食品科技,2019,24:170-173  
CHU Yiran, GUO Jing, LU Meijuan. Analysis of influencing factors of Soxhlet extraction method in determining crude fat content of American soybean [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 24: 170-173
- [14] GB 5009.5-2016,中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]  
GB 5009.5-2016, National Health and Family Planning Commission of the people's Republic of China, State Food and Drug Administration. Determination of Protein in food Safety National Standard Food [S]

(下转第18页)