

文章

人参均质工艺的优化 超细粉体改善其粉体特性和生物利用度

MeiSun 1, 2, Keke Li 2, Yuangpei Zhang 2, Jiwen Li 1, Deqiang Dou 3, Xiaojie Gong 1, 2, *和ZhongyuLi 2, *

1大连理工大学生物工程学院, 大连116034;

sunny201905@是啊。净额 (毫秒)

2大连民族大学生命科学院, 大连116600

3辽宁中医药大学药学院, 大连116600

*通信: gxjclr@163.com (X.G.); lizhongyu2019@是啊。净 (Z.L.)

摘要: 随着消费者对保健品需求的发展, 传统的人参产品在提高其粉末特性和生物利用度方面面临着挑战。本研究的目的是利用高压均质 (HPH) 工艺制备一种新型人参超细粉。采用响应面法测定了HPHpa参数 (压力、通过次数和浓度) 对超细粉体粒径和皂苷组分溶出度的影响。采用Box-Behnken实验设计, 确定了皂苷组分最小粒径和最高溶解的最佳HPH参数。对于在不同参数下获得的粉末, 观察了振实密度、堆积密度、可溶性、持水性、外观和味道的特征。HPH过程的优化实验条件如下: 15,000 psi (压力)、3 (通过次数) 和1 kg/L (浓度)。优化值分别为55 μm (粒径) 和83mg/g (皂苷成分的溶出度)。该方法为HPH工艺的应用提供了技术支持 在人参粉的制备中。这项研究的对象可以扩大到包括各种各样的植物材料, 满足当代工业对成本效益和可持续性的需求

引文: 孙, M; 李; 张; 李; 奕博士; 龚; 李。

人参超微粉均质工艺的优化
粉末, 以改善其粉末

特性和生物利用度。食品2024, 13, 3332。

<https://doi.org/10.3390/foods13203332>

收到日期: 2024年8月28日

修订日期: 2024年10月14日

接受日期: 2024年10月18日

发布日期: 2024年10月20日



版权所有: 作者 ©2024。被许可方 MDPI。本文是根据知识共享署名 (CCBY) 许可的条款和条件分发的开放获取文章 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)。

关键词: 人参超细粉; 高压均质工艺; RSM; 粉末特性; 感官品质

1. 引言

人参是五加科人参属的多年生草本植物, 几千年来一直被视为一种有价值的滋补品和适应原[1]。作为栽培、研究和使用的最多的草药, 人参通常以鲜参、红参或白参的形式生产, 并以粉末、胶囊、提取物或饮料的形式在世界范围内出售[2]。人参产品越来越受到关注, 目前, 全球人参产业市场规模已达到76.1亿美元。随着健康意识的提高和消费者需求的升级, 对高品质人参产品的需求将持续增长。开发不仅有益于肝脏健康, 还能改善感官体验的人参产品非常重要[3]。人参加工方法的创新在实现这些目标中起着至关重要的作用。

人参的常规加工技术, 如切片、研磨、浸泡、压片和提取, 会导致几个限制。这些包括有益成分的利用效率低, 味道和口感不理想, 以及在消费者摄入时的便利性方面的挑战。超细研磨是加工领域的一种创新方法, 可以

将材料的粒径减小到100 μm 以下[4]。超细粉碎工艺可以赋予粉末普通加工方法无法产生的独特性能，如良好的溶解性、分散性、感官特性和生物活性[5, 6]，这已在枸杞[7]、荞麦[8]和桑吉[9]等植物的研究中得到证明。尽管科学家们已经将超细粉碎技术引入制药和食品材料[10]，但由于人参质地坚硬，纤维含量高，传统的超细粉碎技术并不太适合人参，这使得人参很难通过传统方法获得所需的粒度。此外，人参中的高淀粉含量会导致反复研磨过程中的糊化和不良物理化学变化。

高压均质（HPH）是制备人参超细粉的一种可行的替代方法。作为一种新型的湿磨超细粉碎方法，HPH已被应用于许多研究领域，如食品、化工、制药和生物工业[11]。在HPH过程中，材料悬浮在高热容量的水中，可以有效地防止温度升高引起的淀粉糊化。更重要的是，HPH可以通过高压下的突然膨胀有效地破坏细胞壁结构，从而最大限度地溶解生物活性化合物[12]。最近的研究表明，rHPH后竹笋中Amino-noids和多酚的含量显著增加，伴随着苦味的降低和颜色的改善[13]，其他研究也发现了类似的结果[14,15]。

尽管有这些有希望的发现，但通过HPH生产人参超细粉的经济可行性和规模化能力尚未实现。这些挑战源于几个因素。首先，HPH过程取决于各种条件的相互作用，这使得大规模操作的最佳参数的识别变得复杂。这种复杂性会导致产品质量和过程效率的不一致。此外，与设备相关的高成本和均质化过程的能源密集型性质阻碍了经济可行性。还需要彻底了解HPH对人参理化性质的影响，这会影响产品的适销性和消费者的接受度。

基于这一差距，本研究采用响应面法（RSM）对人参粉生产的HPH工艺进行了优化。RSM是一种统计技术，使用数学模型来评估变量和响应之间的关系，从而确定最佳条件。通过将RSM应用于HPH工艺，可以优化压力、均质循环和浓度等参数，以生产粒径减小、生物活性成分利用率提高的人参超细粉末。本文还将探讨上述响应值与人参超细粉的理化性质和测试特性之间的关系，以确定最佳质量参数的生产工艺。目的是突出这种先进方法在促进人参产业现代发展方面的潜力，最终使消费者和生产者都受益。

2. 材料和方法

2.1. 材料

从长白山（中国吉林省，纬度，41°35′~42°25′E；经度，127°40′~128°16′N；海拔2744米），然后在48小时内用冰袋运输到实验室。所有这些都储存在-20℃的冰箱中以供进一步应用。所有其他化学试剂均为分析级，购自北京化工厂（中国北京）。

2.2.实验设计

RSM (StatEase, MN, USA) 用于设计实验。根据早期试验的结果, 选择了均质器中压力 (a) (10,000、15,000、20,000 psi)、通过次数 (B) (3、5、7) 和底物浓度 (C) (1、1.5、2 kg/L) 等自变量的范围。选择Box-Behnken设计 (BBD), 实验总数为17个, 包括5个中心点实验。表1给出了因变量的编码值和实际值。

表1. 实验运行的BBD矩阵, 包含实际值和编码值 (括号内)。

自变量	编码 (括号内) 和实际水平		
	(-1)	(0)	(1)
压力 (A), psi	10,000	15,000	20,000
通过次数 (B), n	3	5	7
浓度 (C), kg/L	1	1.5	2

2.3.人参超细粉的制备

实验室工作主要是用D-15M高压均质器进行的 (图1a, PhD Technology LLC, 明尼苏达州, 美国)。该机由均质阀和泵组成。物质进入均质阀, 通过特定宽度的均质区, 然后经历瞬时压降, 以极高的速率喷射, 通过均质阀中的空化效应、冲击效应和剪切效应的作用实现粒径的减小[16]。图1b显示了材料是如何被均化组分的影响破坏的。

将新鲜人参手动切成1 cm长的段, 浸泡在一定量的纯水中, 然后使用胶体磨研磨, 作为均质过程前的预处理, 以减小纤维的尺寸, 防止堵塞均质喷嘴。根据实验设计调整因变量, 以获得不同的人参果肉。然后将果肉放入冷冻干燥室 (四环启航科技有限公司, 中国北京) 中, 在-25°C和50 Pa的条件下冷冻干燥72小时, 以获得不同的人参超细粉。所有这些都真空包装在箔袋中, 并在4°C下储存以供进一步检查。

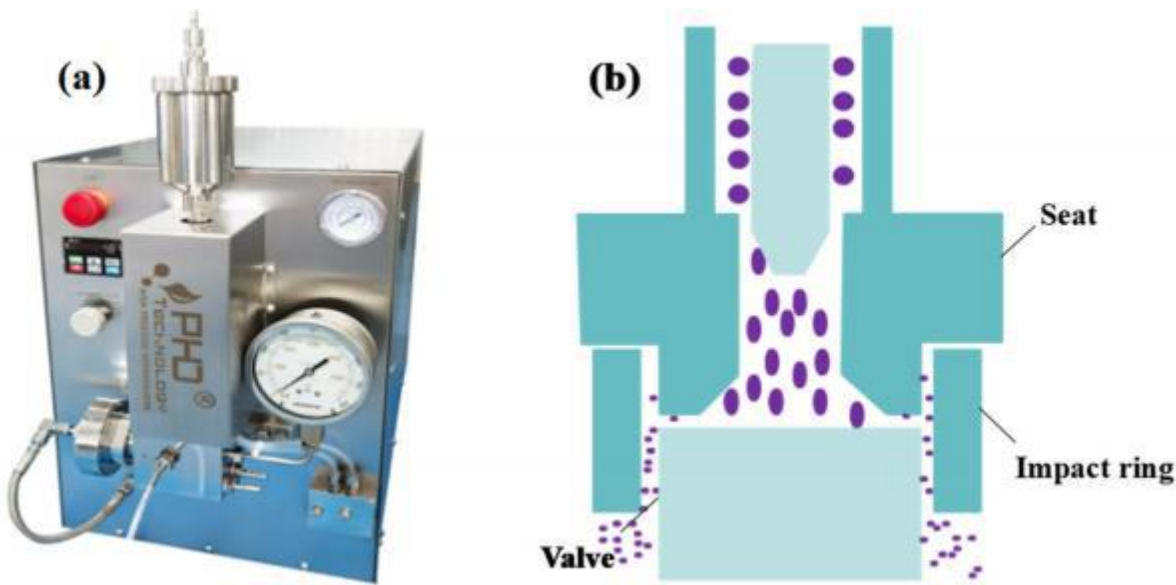


图1. 本研究中使用的高压均质机 (a)。高压均质机的运行性能 (b)。

2.4. 统计分析

获得的响应用四元模型拟合，然后进行方差分析（ANOVA）。此外，模型的充分性由决定系数（R²）、调整后的R²、变异系数（CV）和缺乏拟合来确定。p值低于0.05表明模型项具有统计学意义，而p值超过0.10表明模型项不具有统计学意义。使用二阶多项式回归分析预测的响应变量（Y），如下式（1）所示：

$$Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3+a_{12}x_1x_2+a_{13}x_1x_3+a_{23}x_2x_3+a_{11}x_1^2+a_{22}x_2^2+a_{33}x_3^2, (1)$$

其中Y是预测响应变量，a₀是截距项，x_i是独立因子编码/实际项，a_i是模型系数项。

2.5. 优化

BBD采用了三个相等水平的自变量——低（编码为-1）、中（编码为as0）和高（编码为as+1），只有17组实验。基于BBD的TheRSM用于优化三个自变量。通过为自变量和因变量设定目标来进行优化，这需要控制独立参数和响应（皂苷成分的粒度和溶出度）。评估了工艺变量对响应的影响，以有效地优化工艺参数。

2.6. 人参粉的特征

2.6.1. 直径的测定

人参超细粉的粒径采用激光衍射粒度分析仪（Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, UK）测定。这里，人参超细粉末的粒度分布被报告为粉末体积的97%的最大粒径（D₉₇）。此外，还记录了比表面积（Asf）和跨度值。Asf是指材料每单位质量的总表面积，而SPAN值代表颗粒分布的均匀性和可靠性[7]。

2.6.2. 皂苷成分的溶出

将人参超细粉（1 g）在70°C下溶解在60%乙醇（固液比1:40）中1小时，随后以13,000 rpm离心10分钟（TGL-16高速低温离心机，湘益集团，中国湖南）。将残余物再提取两次，然后将三种上清液合并，并使用旋转蒸发器在60°C真空下蒸发。将蒸发的残余物溶于30ml蒸馏水中，然后用饱和正丁醇溶液萃取三次。使用装有冷却冷凝器的底部Aask蒸发正丁醇，并将残余物溶解在10 mL甲醇中以备用。

通过基于Tang等人描述的香草醛-硫酸比色反应的紫外-可见分光光度法测定皂苷组分的溶解度。具有相同的修改[17]。以人参皂苷Re为标准绘制标准曲线。将总共500μL新鲜制备的8%香草醛-乙醇溶液和5 mL 72%硫酸加入到100μL溶剂干燥的样品中，并置于60°C恒温水浴中反应15分钟。使溶液冷却，并在544 nm处测量吸光度（SuPerMax 3200微量板读数器，Shanpu Co., Ltd., Shanghai, China）。

2.6.3. 堆积密度、振实密度和流动性的分析

根据Ramachandraiah描述的方法进行了一些修改，测量了人参超细粉末的堆积密度和堆积密度[18]。The

将样品装入100 mL量筒中。超细粉末的重量（mg）除以圆筒中所占的体积可用于计算堆积密度值。将相同的量筒敲击100次以上，直到粉末的体积稳定。然后将超细粉末的重量t（mg）除以体积以估计振实密度。通过Carr指数（%）[19]评估样品的可行性。使用等式（2）计算Carr指数：

卡尔指数(%)=(振实密度-堆积密度)/振实密度× 100%(2)

2.6.4.持水能力

采用Zhang等人描述的方法测定了人参超细粉的持水能力（WHC）。有一些修改[20]。将大约1g样品（m0）悬浮在50mL离心管中的25g水（m1）中。然后将粉末悬浮液在电恒温水浴中于60℃振荡60分钟，随后以3000 rpm离心10分钟。然后，取出上清液(m2)并称重。基于等式(3)计算WHC值：

WHC=(M1-M2)/m0 × 100%(3)

2.6.5.形态学

用导电胶带将人参超细粉末悬浮液均匀粘附在金属台上，直至水分自然蒸发。使用E-1010铁溅射器在样品表面溅射涂覆Pt 15秒，然后用扫描电子显微镜pe（日立有限公司，Tokyo, Japan）在5.0 kV的加速电压下观察不同样品的形貌特征。

2.6.6.电子音调

使用SA402B电子舌系统（Intellige ntSensor TechnologyCompany, To-kyo, Japan）测定不同人参样品的味觉特征。Thetongue由自动采样器、一系列化学传感器和化学计量学软件包组成。电子舌不同传感器的响应类型如表2所示。将总共3 g人参超细粉末分别溶解在150毫升水中，然后将混合物以15,000 rpm离心15分钟以收集用于测试的上清液。试验条件包括样品体积120ml，分析时间90s，分析时间336s。在对每个样品溶液进行感官测量后，进行洗涤循环，以确保没有样品残留到下一次分析中，并确保良好的再现性。对每个样品进行测量。

表2.不同化学传感器对电子舌的响应类型。

数字	传感器	响应类型
1	AAE	鲜味
2	CT0	咸度
3	CA0	酸味
4	C00	苦味
5	AE1	收敛
6	GL1	甜味

3.结果与讨论

3.1.拟合模型

利用RSM优化了高压均质机生产人参超细粉的工艺参数。确定了与响应相关的数据，如皂苷成分的粒度和溶出度，并在设计矩阵中详细说明（表3）。使用二阶多项式响应面模型对响应变量（Y）进行建模。回归分析和ANOVA都被用来估计模型和评估术语的统计相关性。分别给出了粒度（Ta-ble 4）和皂苷组分溶出度（表5）的ANOVA结果，包括统计参数。

表3.三因素三水平BBD矩阵和响应a。

Std	运行	A因子 压力 (磅/平方英寸)	B因子 通过次数 (n)	C因子 浓度 (kg/L)	粒度 (μM)	溶出度
						组分 (mg/g)
1	7	10,000	3	1.5	153 68	
2	11	20,000	3	1.5	7676	
3	4	10,000	7	1.5	13870	
4	13	20,000	7	1.5	33 70	
5	1	10,000	5	1	12974	
6	2	20,000	5	1	24*72	
7	5	10,000	5	2	176**66*	
8	16	20,000	5	2	98 80	
9	14	15,000	3	1	5583	
10	12	15,000	7	1	4285	
11	15	15,000	3	2	107 84	
12	6	15,000	7	2	104 88	
13	8	15,000	5	1.5	87 89	
14	9	15,000	5	1.5	86 86	
15	3	15,000	5	1.5	90 85	
16	17	15,000	5	1.5	8391**	
17	10	15,000	5	1.5	81 85	

a, *对应于最小值, **对应于最大值。

表4.自变量对粒径a、b的线性、二次和相互作用影响的方差分析。

来源	平方和	df	均方	F值	p值	
模型	26,887.81	9	2987.53	75.78	<0.0001	显著
A-压力	16,653.13	1	16,653.13	422.44	<0.0001	
B-通过次数	684.5	1	684.5	17.36	0.0042	
C-浓度	6903.12	1	6903.12	175.11	<0.0001	
AB	196	1	196	4.97	0.061	
AC	182.25	1	182.25	4.62	0.0686	
公元前	25	1	25	0.6342	0.452	
A2	2070.44	1	2070.44	52.52	0.0002	
B2	241.6	1	241.6	6.13	0.0425	
C2	2.87	1	2.87	0.0727	0.7952	
残差	275.95	7	39.42			

不适合	226.75	3	75.58	6.14	0.0559不显著
纯错误	49.2	4	12.3		
全色	27,163.76	16			

a R2=0.9898，校正R2=0.9768，Adeq精密度=31.1494，CV（%）=6.83。b p<0.05表明模型项是显著的。

表5.自变量对皂苷组分a、b溶出度的线性、二次和相互作用影响的方差分析。

来源	平方和	df	均方	F值	p值	
模型	1008.94	9	112.1	17.32	0.0005	显著
A-压力	50	1	50	7.73	0.0273	
B-通过次数	0.5	1	0.5	0.0773	0.7891	
C-浓度	2	1	2	0.3091	0.5956	
AB	16	1	16	2.47	0.1599	
AC	64	1	64	9.89	0.0163	
公元前	1	1	1	0.1545	0.7059	
A2	837.09	1	837.09	129.35	<0.0001	
B2	18.57	1	18.57	2.87	0.1341	
C2	0.0421	1	0.0421	0.0065	0.938	
残差	45.3	7	6.47			
不适合	16.5	3	5.5	0.7639	0.5705	不显著
纯错误	28.8	4	7.2			
全色	1054.24	16				

a R2=0.9570，校正R2=0.9018，Adeq精密度=10.7376，CV（%）=3.20。bp<0.05表明模型项是显著的。

通过检查p值来确定每个因素的显著性水平。p值较低的患者具有高度显著性。如表4所示，A（压力）、B（通过次数）和C（浓度）的线性效应以及A（压力）和B（通过次数）的四次效应被确定为模型中的重要项。然而，相互作用项显示出显著的影响。如表5所示，A（压力）的线性效应、A（压力）的二次效应以及A（压力）和C（浓度）的相互作用效应对皂苷成分的溶出有显著影响。术语“缺乏拟合”很好地表明了模型的失败，而模型的不显著“缺乏拟合”表明模型令人满意地拟合了实验数据。R2值代表响应变量中可从解释变量预测的可变性分数。通常建议R2值应高于0.80，以表明模型拟合良好，因为低于该阈值的值表明模型可能无法充分捕捉变量之间的联系tudy.虽然高r2值通常是可取的，但它并不是模型充分性的明确指标。因此，评估调整后的r2值是至关重要的，因为它提供了一个更准确的测量模型适合数据的程度，考虑到模型[21]中预测器的数量。方差分析结果表明，粒径和皂苷成分分布的r2值分别为0.9898和0.9570，表明响应模型可以解释95%的总变化。调整后的r2值分别为0.9768和0.9018。高r2和调整后的r2值表明，模型中没有添加不显著的项。足够的精度值表示信噪比，首选的精度比超过4 [22]。根据方差分析结果，每个响应的适当值超过4，表明一个强信号，表明模型拟合是有效的。变异系数（CV）代表了估计数的标准误差相对于观察到的响应的平均值的比例，作为模型的可重复性的指标。较小的

数值（6.83%，3.20%）表明实验数据的精确度和可靠性更高。通过对实验数据进行多元回归分析，利用随后的二次多项式方程（4）和（5）建立了响应变量和测试变量之间的关系：

$$y_{\text{粒度}} = 85.40 - 45.63 \times 1 - 9.25 \times 2 + 29.38 \times 3 - 7.00 \times 1 \times 2 + 6.75 \times 1 \times 3 + 2.50 \times 2 \times 3 + 22.17 \times 12 - 7.58 \times 22 - 0.825 \times 32, \quad (4)$$

$$\text{皂苷组分的溶出度} = 87.20 + 2.50 \times 1 + 0.25 \times 2 + 0.5 \times 3 - 2.00 \times 1 \times 2 + 4.00 \times 1 \times 3 + 0.50 \times 2 \times 3 - 14.10 \times 12 - 2.10 \times 22 - 0.10 \times 32, \quad (5)$$

其中Y是皂苷成分的粒径和溶出度的响应。从等式(4)和(5)获得的值如表3所示。

上述结果表明，多项式回归模型与实验数据吻合较好，表明本研究使用的模型能够确定高压均质生产人参超细粉的最佳操作条件。

3.2. 响应面分析

利用响应面的三维表示，说明了因变量和自变量之间的关系对皂苷组分的粒径和溶出度的影响。数据是通过在中间水平保持一个变量常数，同时在实验范围内改变其他变量来生成的。响应表面通过粒度（图2）和saponin组分的溶解（图3）与均化压力、通过次数和浓度的关系来可视化。

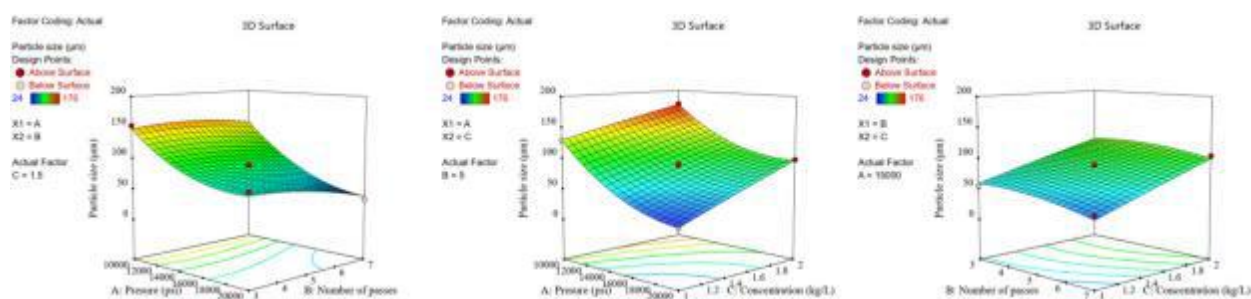


图2。响应曲面图显示了（a）压力和通过次数，（B）压力和浓度，以及（C）通过次数和浓度对人参超细粉粒径的影响。趋势表明，压力的增加和浓度的降低导致颗粒尺寸的减小。然而，通过次数的影响并不显著。图中的颜色模式对应于颗粒大小的值，其中蓝色（最小值）、绿色（中间值）和黄红色（最大值）。

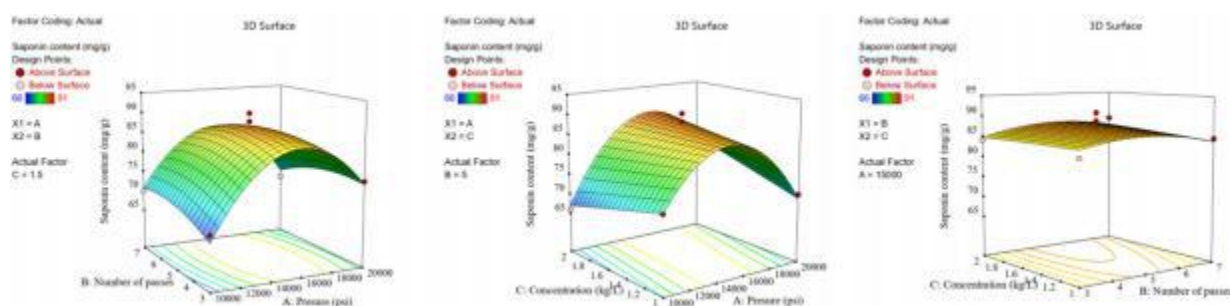


图3。响应曲面图显示了（a）压力和通过次数、（B）压力和浓度以及（C）通过次数和浓度对人参超细粉皂苷成分溶出的影响。结果表明，压力对总皂苷组分的溶出有显著影响；然而，通过次数的影响

浓度不显著。图中的颜色模式对应于particlesize的值，其中蓝色（最小值）、绿色（中间值）和黄色（最大值）。

3.2.1. 粒度

实验运行2和运行5的人参粉末的粒径分别在24 μm 和176 μm 的范围内。较高的压力（20,000 psi）和最小浓度（1kg/L）导致更好的粒度减小，表明压力和浓度对粉末粒度的减小有显著影响。为了观察不同粉末的特征粒度分布，选择代表低、中和高粒度水平的样品（运行1、2和16）进行分析。如图4所示，不同粒径的粉末表现出相似的均匀性。响应面图显示，均质压力对人参超细粉的粒径有正线性影响，而浓度对人参超细粉的粒径有正线性影响。然而，通过次数的影响要低得多，增加均化循环仅导致粒度略有减小。

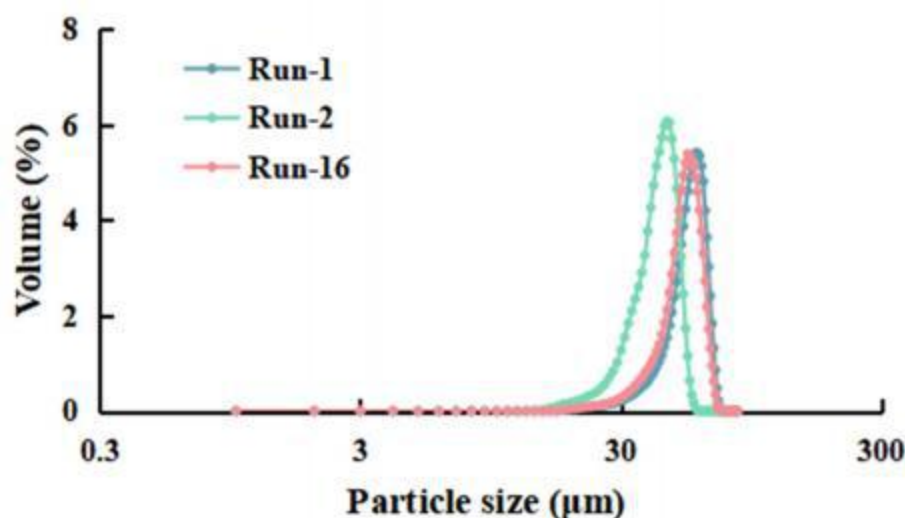


图4. 随机选择人参超细粉的粒度分布。随机选择的三种人参超细粉的粒度分布如下：运行-1（ $D_{97.1} 29.83 \pm 5.08 \mu\text{m}$ ）、运行-2（ $D_{97.2} 24.25 \pm 1.08 \mu\text{m}$ ）和运行-16（ $D_{97.16} 98.82 \pm 2.08 \mu\text{m}$ ）。图表表明，不同的粉末表现出相似的均匀性。

基于较高的压力，均质化可以通过突然膨胀破坏细胞结构来有效地减小颗粒尺寸【23, 24】。王等人研究了高压均质对降低材料粒径的影响，表明增加压力可以显著降低纤维素的粒径【25】。Davoudpour等人发现，均质压力的增加会导致红麻韧皮纤维素纳米纤维直径的减小【26】。浓度增加引起的高粘度可能导致高压均质过程中的流动性变差。当高粘度材料通过机器的窄缝时，均质机的机械作用可能会减弱，这使得在均质过程中减小这些材料的粒度变得具有挑战性[27]。

3.2.2. 皂苷成分的溶出

皂苷组分的溶出度在66mg/g至91mg/g的范围内。通过响应面图可以观察到，通过次数和浓度对人参超细粉中总皂苷成分的溶出没有显著影响。通过比较，均化压力具有

对它有显著影响。皂苷组分的溶解值在10,000-15,000 psi的压力下最初增加，在15,000-20,000 psi的压力下再次降低。

人参皂苷分布在细胞壁和液泡等特定区域，通常与细胞成分（多糖、果胶和纤维素）共价键合[28]。由于细胞壁和细胞器结构的破坏，皂苷成分的溶解与均质压力具有显著相关性（图5），这导致与其结合的活性物质的释放显著增加。王等人。据报道，高压均质化导致类黄酮和多糖的释放增加，与细胞壁结合[13]。姜等人。在他们的研究中，报道了高压均质增加了竹笋的酶解能力[12]。简单地说，适当的压力可以通过破坏细胞壁和细胞器来增加活性物质的溶解。然而，在较高的压力下，增加的冲击力和剪切力可能会导致粉末粒度的极度减小[26]。这种较小的粒径导致较差的分散性，这阻碍了溶剂介质的润湿和分散，并因此导致活性化合物的溶解减少[29]

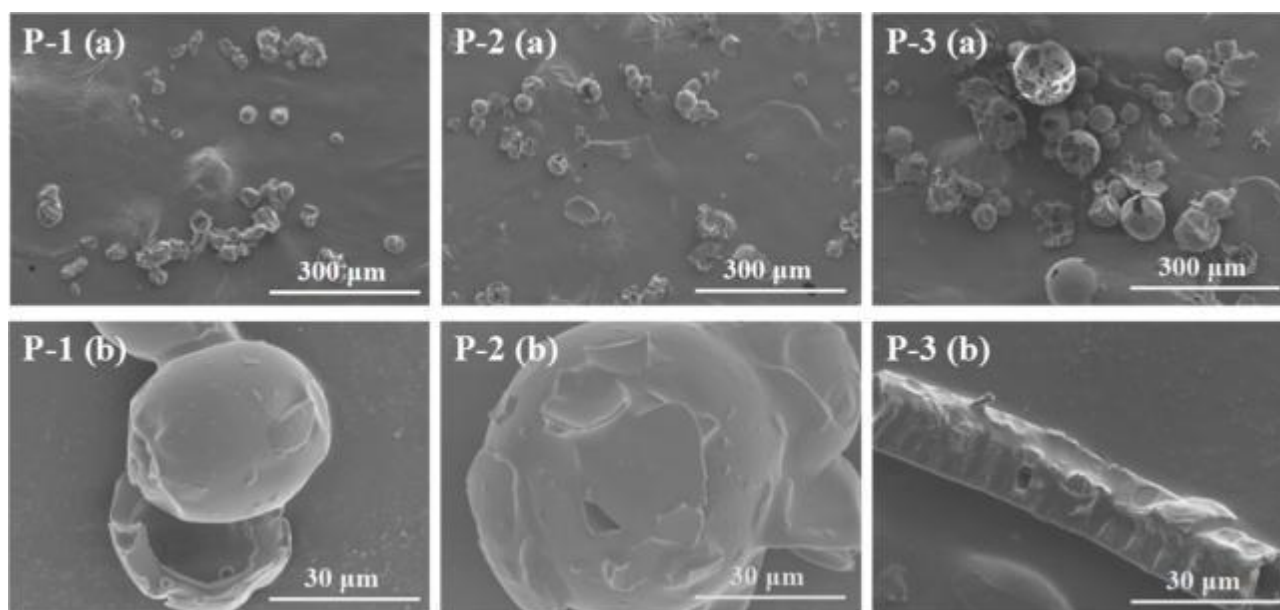


图5。在变量的低（P-1，运行-2）、中（P-2，运行-14）和高（P-3，运行-17）水平下获得的粉末的半显微图。（a，b）分别显示了不同粉末的整体和部分。

3.3. 实验条件的优化

为了获得高质量的人参超细粉，其关键元素是较小的马铃薯颗粒尺寸和较高的皂苷成分的溶解度。因此，对同源压力、通数和材料浓度进行了优化，以获得最小粒径和最大皂苷含量。最佳实验条件如下：人参浆的最小颗粒大小为20000psi浓度1公斤/L下5次，皂苷成分的最大溶解度通过均质人参的浓度为1.5公斤/L压力下15000psi。结果表明，优化的实验条件随粒径和皂苷含量的溶解度而不同。因此，确定一种具有最佳物理和化学性能的单—操作条件被认为是有价值的。的性能参数

分析了在变量的低（P-1，运行2）、中间（P-2，运行14）和高（P-3，运行17）水平下获得的粉末。

3.3.1.堆积密度、振实密度和流动性

堆积密度、振实密度和流动性是食品工业中评估粉末质量的重要参数[30]。堆积密度和振实密度较高的粉末可以更有效地利用包装空间，而密度较低的粉末更容易溶解和分散[31]。在工业生产中，有必要根据粉末的预期用途确定粉末的适中密度，以实现粉末的储存成本和均匀性之间的平衡。一般来说，粉末的粒径越小，颗粒之间的孔隙空间越小，这反过来导致更高的密度[32]。如表6所示，P-1的堆积密度略高于其他两种粉末，振实密度遵循相同的趋势。这些结果与上述结论一致。然而，这三种超细粉末的堆积密度和振实密度之间没有显著差异，这表明均匀性参数的变化对它们的影响很小。表6.粒度对堆积密度、振实密度和流动性的影响a, b。

样品	堆积密度 (mg/mL)	振实密度 (mg/mL)	卡尔指数 (%)
P-1	471.49±20.81	615.76±20.71 a	23.23
P-2	453.53±11.88	572.57±20.96 a	20.64
P-3	452.79±19.33	552.88±11.25 b	19.79

a数据表示平均值±标准偏差。(n=3) 不同的小写字母显示出显著差异。(p<0.05)。

Carr指数也用于评估粉末产品的流动性。随着粉末粒度的相应减小，Carr指数略有增加[33]。Carr指数值在0-15%之间被认为是良好的流动性，15-25%在良好的流动性范围内，25-30%被认为是差的范围内，超过30%被认为是非常差的流动性[34]。如表6所示，观察到P-1（Carr指数：23.23%）、P-2（Carr指数：20.64%）和P-3（Carr指数：19.79%）的流动性相当好。

3.3.2.持水量（WHC）

WHC值影响粉末和水的结合能力，这与粉末在受到离心力或压缩时保持水分的能力有关[35]。在食品和饮料工业中，WHC值较高的粉末通常具有更光滑和更细的质地。此外，当与液体混合时，它们通过吸收水分表现出增强的溶解度和分散性【36】。如图6所示，WHCofP-3低于其他两个样品（p<0.05）；P-2和P-1的值无差异（P>0.05）。简而言之，P-1和P-2样品表现出更好的持水能力。

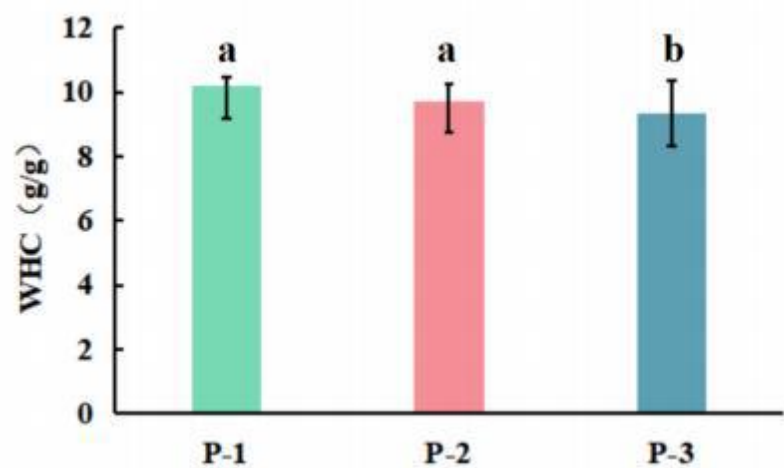


图6.在变量的低（P-1，运行-2）、中（P-2，运行-14）和高（P-3，运行-17）水平下获得的粉末的WHC值的影响（数据代表平均值±标准偏差。不同的小写字母显示显著差异（ $p<0.05$ ， $n=3$ ））。

3.3.3.形态学

用扫描电镜分析了不同形态水平下的结构变化。如图5a所示，b分别显示了不同粉末的一个整体和一个切片。从图5a中可以看出，P-1、P-2、P-3的粒径逐渐增大，这与部分筛分分析仪的分析结果一致。具体来说，P-1粉末明显聚集，由较小颗粒或粘在较大颗粒上的碎片形成。由于粉末[9]的积累，皂苷组分的溶解度会降低，这与上述研究结果一致。相比之下，P-2的组织结构基本被破坏，导致纤维在视野范围内表现出不规则的部分循环。然而，植物组织表现出相对的联系外观。进一步放大的图像（图5b）显示，在p-1和P-2样本中没有完整的细胞结构。同时，人参颗粒表现出有裂缝的固体表面，这是活性化合物[37]差异差异的原因。然而，完整的软木细胞和树脂茶在P-3视觉文件中仍然可以看到nnel碎片

3.3.4.电子舌法的味觉特征分析

电子舌，用于客观评价，如口味的鉴别和量化，被称为一种传感技术，有助于质量管理[38]。电子舌头最近被用来评估口味的中药，何首乌[39]，小檗碱[40]，柑橘网状[41]和五味子[42]。

为了研究不同均质条件是否会影响人参超细粉的味觉特征，采用电子舌对其味觉指标进行了评价。SA402B电子舌系统中有六个不同的传感器。根据三组人参超细粉在这六个传感器上的响应值绘制了雷达色谱图，其中不同的颜色代表不同的人参超细粉。如图7所示，在每组中，咸味和涩味传感器对超细粉末样品的响应值最高，而酸味在所有传感器中的响应值最低。除酸度和酸度略有差异外，三组之间的味道无显著差异。简而言之，三组样品的总体味道相似，可以更明显地归类为属于同一类别。

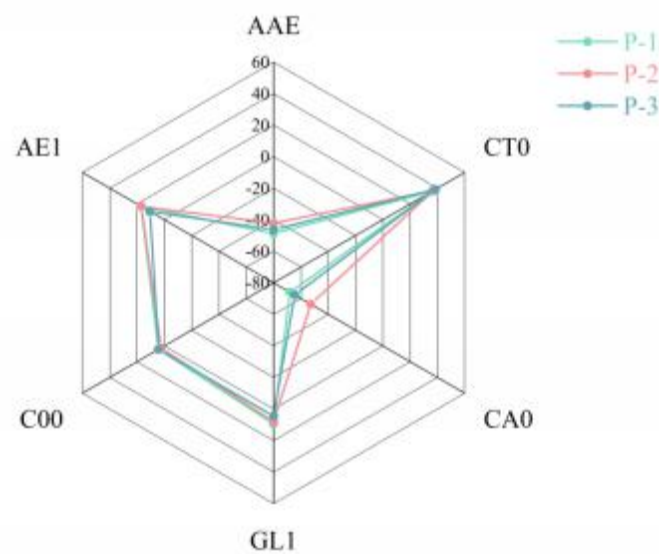


图7。在低水平（P1、运行2）、中间水平（P2、运行14）和高水平（P3、运行17）下获得的粉末的电子舌雷达分析曲线。

4.结论

本研究旨在通过优化u singRSM的高压工艺制备具有优良粉末特性和生物利用度的人参超细粉。通过BBDex实验研究了高压、道次数和浓度对人参超细粉粒径和总皂苷溶解度的影响。对三种代表性超细粉末（标记为P-1、P-2和P-3）的粉末特性进行了比较，包括密度、堆积密度、纯度、WHC、外观和味道。实验和统计分析结果表明，粉末P-1和P-2在所评估的所有粉末特性中表现出优异的性能，这对于粉末产品的功能性和消费者接受度至关重要。生产成本与循环次数密切相关。在考虑了生产相关因素后，确定了P-2的生产条件（压力：15,000 PAI，通过次数：3，浓度：1 kg/L）为最佳工艺参数。在优化条件下，记录了粒径(55 μ m)和总皂苷溶出度(83 mg/g)的响应 优良的粉末和味道特点

本文提出的方法具有一定的通用性，对指导富含高纤维和淀粉的植物生产超细粉体具有重要意义。该研究还可以扩展到其他类型的传统中药材，以实现更广泛的应用，并满足成本效益和可持续性的要求。

由于本研究仅测试了皂苷成分的溶解离子，基于人参活性成分的多样性，应评估更多种类的活性基团，以系统地探索超细粉碎对样品的影响。此外，基于人参的多种生物活性，可以对不同粒径的粉末进行后续的生物活性功能实验，旨在扩大人参超细粉末在功能食品领域的应用潜力。

作者贡献：写作-初稿准备，硕士；写作-评论和编辑，Li.K.I方法论，张。Y.Z.；验证，法学博士；项目管理博士；监督，X.G。概念化和写作-评论和编辑，Z.L。所有作者都已经阅读并同意手稿的出版版本。

基金：本工作得到了国家自然科学基金（82173913）、辽宁省教育厅（LJ232412026010）、大连市高层次人才创新支持计划-尖端领军人才（2021RD10）、辽宁省重点研发项目（2023JH2/101300111）的支持。

机构审查委员会声明：不适用。

知情同意声明：不适用。

数据可用性声明：研究中提出的原始贡献包含在文章中，进一步的询问可以直接联系相应的作者。

利益冲突：作者声明没有利益冲突。

参考文献

1. Yu, T.; 杨, 郭先生; 宋; 金; 李先生; 人参皂苷Rc通过靶向坦克结合激酶1/干扰素调节因子-3和p38/ATF-2发挥抗炎活性. *J. Ginseng Res.* 2017, 41, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.02.001>.
2. 公园, J.; 金, J.; Ko, E.S.; Jeong, J.H.; Park, C.O.; Seo, J.H.; Jang, Y.S. 人参粉的酶促生物转化作用可增加少量人参皂苷的含量, 增强免疫刺激活性. *J. 人参玫瑰.* 2022, 46, 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2021.12.005>.
3. Lee, H.S.; 权, k.; 用分子压机脱水法测定人参粉的质量特性. *J. Biosyst. Eng.* 2009, 34, 155–160. <https://doi.org/10.5307/JBE.2009.34.3.155>.
4. 奥古斯托-奥巴拉, r.; 德奥利维拉, J.; DaGloria, E.M.; FilletSpoto, M.H.; 戈, K.; De SouzaVieira, F.T.M.; , E. 超细研磨法对巴西绿色蜂胶提取物抗氧化和抗真菌特性的影响. *科学. 农业.* 2019, 76, 398–404. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0056>.
5. Dhiman; P.K. 食品加工中的微粉化: 对微粉化食品材料的机械化方法、物理化学、功能特性和自刺能力的综合综述. *J. 食品科学. 技术.* 2021, 292, 110248. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110248>.
6. 刘, F.; 他, C.; 王, L.; 王, M. 铣法对苦荞粉化学成分和抗氧化能力的影响. *Int. J. 食品科学. 技术.* 2018, 53, 2457–2464. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13837>.
7. Zhang, J.T.; Dong, S.Y.; Nisar, T.; Fang, Z.X.; Wang, Z.C.; Guo, Y.Y. 超细磨对枸杞粉物理性能和抗氧化性能的影响. *权力技术.* 2020, 372, 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.pow-tec.2020.05.097>.
8. Huang, Y.W.; Sun, X.X.; Guo, H.M.; 他, x.S.; Jiang, J.; Zhang, G.Q.; 李, w.h. 普通荞麦淀粉超细加工后热化、糊化、形态和结构特征的变化. *Int. J. FoodSci. 技术.* 2021, 56, 2696–2707. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14899>.
9. 吴, z.G.; 阿米尔, K.; 江, g.H. 超翅片研磨对三池（三七）花粉的理化性质和抗氧化活性的影响. *J. 食品科学. 技术.* 2021, 58, 62–73. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04514-2>.
10. 王 B.; 牛、J、麦, B.; 石, F.; 李, M.; 陈, L.; 王, 刘; 提取方法对超细粉多糖抗氧化和免疫调节活性的影响. *糖conj. J.* 2021, 37, 777–789. <https://doi.org/10.1007/s10719-020-09949-5>.
11. 张, Y.x.; 张, P.Y.; 郭, J.B.; Ma, W.F.; Fang, W.; Ma, B.Q.; 徐, x.z. 通过高压混合化使污泥溶解. *水科学. 技术.* 2013, 67, 2399–2405. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.141>.
12. 江, z.; 费, b.H.; 李, z.q. 高压均质器酶解乙醇发酵超高压爆炸预处理. *生物反应器. 技术.* 2016, 214, 876–880. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.025>.
13. 王, L.; 罗, Y.Y.; Zhang, Y.; Zou, C.X.; Wang, P.J.; Qin, L.K.; Zhu, Q.J.; Jia, Y.L. 植物乳杆菌和白杆菌发酵竹笋（喜竹）细全果肉的质量分析. *食品生物科学.* 2023, 52, 102458. <https://doi.org/10.1016/j.FBIO.2023.102458>.
14. Xu, Q.L.; 黄河; 杨, P. 王; 邢, Y. 刘; 吴; 车; 张, P. 不同超细粉碎技术对branpowder. *RSC Adv.* 2021, 11, 308 98–30910. <https://doi.org/10.1039/D1RA05093A>.
15. Pan, L.; 胡; 丁; 梁; 常; 山, Y. 湿法超微粉碎对脐橙全果肉多酚和抗氧化活性的影响. *湖南农业. Sci.* 2018, 20, 13–19. <https://doi.org/10.16175/j.cnki.1009-4229.2019.04.002>.
16. Onumaegbu, C.; 阿拉斯瓦德公司; 罗德里格斯角; 奥拉比公司. 微藻生产生物柴油预处理工艺参数的优化. *能源* 2018, 11, 806. <https://doi.org/10.3390/en11040806>.
17. Tang, P.; 任; 邹海燕; 刘; 张, J.S. 艾志勇; 胡; 崔; 南湾; 张, Z.C. 等. 热处理鲜人参总皂苷对环磷酸腺苷诱导的小鼠肝损伤的改善作用. *食品科学.* 2024, 8, 100 734. <https://doi.org/10.1016/J.CRF5.2024.100734>.

18. Ramachandraiah, K.; 钦, K.B. 干燥和微粉化对芹菜茎理化性质和抗氧化活性的影响. *J.Sci. 食品农业*. 2017, 17, 4539–4547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8321>.
19. 卡尔, R.L. 评估固体的流动特性. *化学工程* 1965, 72, 163–167.
20. Zhang, M.; 张, C.-J. 什雷斯塔. 茶心谷黄超细粉的制备工艺研究. *J. 食品工程*. 2005, 67, 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.036>.
21. Koocheki, A.; Taherian, A.R.; Razavi, S.; 波斯坦, A. 优化提取率、粘度、色调和乳液稳定性的响应面方法. *食物水酚*. 2009, 23, 2369–2379. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.06.014>.
22. Mahawar, M.K.; Bharimalla, A.K.; Arputharaj, A.; Palkar, J.; Dhakane-Lad, J.; 加, K.; 制备纤维素纳米晶体稳定纳米疏悬浮液的工艺参数的响应面优化. *科学. 众议院* 2023, 13, 20678. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47164-y>.
23. 方W. 张.; 叶, J.; Wu, Y.; Zhang, H.B.; Liu, J.B.; 朱Y.; 曾g.M. 高压均质化后污水污泥分解的理化性质. *Int. 生物洗涤剂. 生物点*. 2015, 102, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.030>.
24. 叶T; juboori, R. A. 农业应用中微器官主义破坏的替代方法. 应用程序. *Energy* 2014, 114, 909–923. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.085>.
25. Wang, X.; Huang, M.; Yang, F.; Sun, H.; Zhou, X.; Guo, Y.; Wang, X.; Zhang, M. 油菜多糖作为益生元的体外益生菌的生长和酸化活性. *碳水化合物. 多形性* 2015, 125, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.car-bpol.2015.02.040>.
26. 达沃普尔; 侯赛因, S.; AbdulKhalil, H.P.S.; MohdIshak, Z. A.; 哈桑, 利用表面法分离纤维素纳米纤维的高压均质参数的A.; Sarker, Z.I. Optimi-zation. 指示作物道具. 2015, 74, 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.029>.
27. 以聚氨酯和微纤维化纤维素为基础的新型纳米材料. 拼写. *科学. 技术*. 2008, 68, 908–914. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.08.008>.
28. 程, z. jj.; Xiong, Y.; Ma, T.D.; Wang, Q.Y.; Song, M.X.; Zhao, Q.H.; Zhang, N.; 郭, J.B.; Wang, Y.H.; 侯, z.g.; et al. 田间条件下人参病的分布及风险评价. *J. 代理. 食物化学*. 2024, 72, 6613–6624. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.3C07832>.
29. Cai, L.; Liang, S.Y.; Dai, K.J.; Xiang, F.J.; Luo, Z.Q. 人參微粉与普通粉溶解性能的比较. *J. 南地中海. 大学的*. 2013, 33, 1547–1550. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4254.2013.10.31>.
30. 黄, x.; 窦, J. 超细研磨对甜菜浆粉性能的影响. *LWT-食品科学. 技术*. 2018, 87, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.067>.
31. 苏马, H.B.; 布瓦内什瓦里; 加尼格河谷; 贾加迪什有限公司; 吉里达尔古达尔; 帕蒂尔有限公司; 钱德拉舍卡. 辣木叶、生香蕉和浓缩乳清蛋白制备的速溶饮料混合物的物理、重构和酚类特性. 测量. *食品* 2023, 11, 100 108. <https://doi.org/10.1016/J.MEAFOO.2023.100108>.
32. Cao, X.; 张, 男; 穆宗达尔公司; 钟; 王. 纳米粉体加工对大麦草理化和营养特性的影响. *粉末技术*. 2018, 336, 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.05.054>.
33. Quispe-Condori, S.; 萨尔达尼亚, 医学博士; 特梅利. 用玉米醇溶蛋白喷雾和冷冻干燥对亚麻油进行微胶囊化. *LWT-食品科学. 泰克内尔*. 2011, 44, 1880–1887. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.01.005>.
34. Muttakin, S.; 金, 硕士; 李, D.U. 利用气流粉碎技术调整脱脂豆粉的理化和感官特性. *食品化学*. 2015, 187, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.104>.
35. Viuda-Martos, M.; 纽约州鲁伊斯-纳瓦哈斯; 马丁-桑切斯, A.; 桑切斯-萨帕塔, E.; 费尔南德斯-洛佩斯, J.; 森德拉, E. 萨亚斯-巴贝拉, E.; 纳瓦罗角; 佩雷斯-阿尔瓦雷斯, J.A. 石榴的化学、理化和功能特性.) 甘蔗渣粉副产品. *J. 食品工程*. 2012, 110, 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.029>.
36. 江, G.H.; 吴; K.阿米尔; 李; K.拉马钱德拉亚. 人参不溶性膳食纤维的粒径及其对理化性质和抗氧化活性的影响. *应用. 生物. 化学*. 2020, 63, 70. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00558-2>.
37. Liu, C.; 杨; 赵; 刘; 李; 刘; 周山口. 粒径减小联合 β -环糊精对人参皂苷体外溶出度和体内相对生物利用度的影响. *食品功能*. 2022, 13, 108 82–10894. <https://doi.org/10.1039/D2FO01098D>.
38. Ceto, X.; 萨尔马, 男; 米 (meter的缩写)) 瓦莱. 用电子舌分析香料和草药及其酚类含量. *技术*. 2024, 191, 115578. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.115578>.
39. Xing, Y.C.; 严; 李; T.特卡; 潘; 窦志勇; 高; 何, J. 韩, L.F. 基于LC-MS、ICP-OES和电子舌分析的物质和味道鉴别何首乌加工程度的有效策略. *J. 药. 生物医学. 肛门*. 2021, 205, 114328. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2021.114328>.
40. 王, Y.J.; 冯Y.; 吴Y.; 梁S.; 徐D.S. 用电动舌对盐酸小檗碱味道的感官评价. *Fitoterapia* 2013, 86, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2013.02.010>.

- 41.石, 问。; 郭, T.T。; 阴, T.J.; 王, Z.Q。; 李, C.H。; 孙, X.; 郭, Y.M。; 利用伏坦电子通音系统对不同年龄的柑橘网状结构进行分类。Int. J. Electrochem.科学的科学。2018, 13, 11359–11374.<https://doi.org/10.20964/2018.12.45>.
- 42.Mou, Q.Q.; 他, J.X。; 李福。; 杨, B.; Yang, L.X.; 李, H。利用电子舌和超高效液相色谱结合化学计量学对五味子和五味子进行快速鉴别。ActaEcol.罪。2018,38, 193–199.<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.11.004>.

免责声明/出版者说明: 所有出版物中包含的声明、意见和数据仅属于个人声明、作者和非MDPI和/或编辑。MDPI和/或编辑不对任何想法、方法、仪器或产品造成的任何伤害人员或财产承担责任。