

酶法提取麦冬总多糖与总皂苷工艺优化

李慧灵, 彭家伟, 欧建佳, 周金林*

(广东金骏康生物科技有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 通过单因素试验和正交试验优化纤维素酶-果胶酶复合体系提取麦冬总多糖和总皂苷的工艺。结果表明, 纤维素酶对总多糖的提取具有显著促进作用, 果胶酶则更利于总皂苷溶出。纤维素酶与果胶酶质量比为 3:1 时, 总多糖和总皂苷含量分别达 18.70% 和 0.52%。正交试验确定最佳工艺参数为复合酶添加量 3.5%、温度 50 °C、pH5.0、时间 3 h, 此条件下总多糖和总皂苷含量较传统水提法分别提高 65.49% 和 85.71%。

关键词: 麦冬; 总多糖; 总皂苷; 酶处理; 提取工艺

Optimization of Enzymatic Extraction Process of Total Polysaccharides and Total Saponins from *Ophiopogon japonicus*

LI Huiling, PENG Jiawei, OU Jianjia, ZHOU Jinlin*

(Golden Health (Guangdong) Biotechnology Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: The extraction process of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus* (L.f) Ker-Gawl. was optimized through single-factor and orthogonal experiments via a cellulase-pectinase complex system. The results indicated that cellulase significantly promoted the extraction of total polysaccharides, whereas pectinase facilitated the dissolution of total saponins. When the mass ratio of cellulase to pectinase was 3:1, the content of total polysaccharides and total saponins reached 18.70% and 0.52%, respectively. Orthogonal experiments identified the optimal conditions as an enzyme dosage of 3.5%, temperature of 50 °C, pH5.0, and time of 3 h. Under these conditions, content of total polysaccharides and total saponins increased by 65.49% and 85.71%, respectively, compared with those of water extraction.

Key words: *Ophiopogon japonicus* (L.f) Ker-Gawl.; total polysaccharides; total saponins; enzyme treatment; extraction process

引文格式:

李慧灵, 彭家伟, 欧建佳, 等. 酶法提取麦冬总多糖与总皂苷工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(23): 139-144, 162.

LI Huiling, PENG Jiawei, OU Jianjia, et al. Optimization of Enzymatic Extraction Process of Total Polysaccharides and Total Saponins from *Ophiopogon japonicus*[J]. Food Research and Development, 2025, 46(23): 139-144, 162.

麦冬为百合科植物麦冬[*Ophiopogon japonicus* (L.f) Ker-Gawl.]的干燥块根, 呈纺锤形, 两端略尖, 表面淡黄色或灰黄色, 有细纵纹, 气微香, 味甘且微苦, 具有养阴生津、润肺清心等功效^[1-2]。现代药理学研究表明, 麦冬的主要活性成分包括甾体皂苷类^[3](如麦冬皂苷 A、B、D)和多糖类化合物^[4-5], 其中甾体皂苷类以鲁斯可皂苷元和薯蓣皂苷元为苷元结构, 具有抗心肌缺血、抗心律失常及降血脂作用^[6-9]; 而麦冬多糖则表现出免疫调节、抗氧化及抗肿瘤活性^[4-5, 10-11]。然而, 传统提取方法(如水提、醇提)^[12-13]因未能充分破坏植物细胞壁结

构, 导致多糖和皂苷的溶出率显著受限, 且生物利用度低, 严重制约了其应用价值。2024年8月26日, 麦冬被正式列入《药食同源目录》, 进一步拓展了其在功能食品和健康产品领域的开发潜力。近年来, 酶辅助提取技术因绿色、高效的特点被广泛用于植物加工和提取中, 如纤维素酶和果胶酶的应用^[14-15], 能有效降解植物细胞壁, 使其有效物质释出, 从而实现提高提取效率的目的。因此, 本研究聚焦于酶处理工艺的优化, 通过单因素试验和正交试验优化纤维素酶-果胶酶复合体系提取麦冬总多糖和总皂苷的工艺, 旨在建立高效、绿

作者简介: 李慧灵(1989—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 生物酶发酵与应用。

*通信作者: 周金林(1977—), 男, 博士, 研究方向: 中草药和农产品精深加工、生物合成与酶催化。

色的麦冬提取体系,为麦冬的开发和加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

麦冬:四川代代为本公司;鲁斯可皂苷元标准品(98%,色谱纯)、D-葡萄糖标准品(98%):江苏永健医药科技有限公司;纤维素酶(30 000 U/mL)、果胶酶(30 000 U/mL):潍坊康地恩生物科技有限公司;十二水合磷酸氢二钠、一水合柠檬酸钠、乙酸、甲醇、正丁醇、苯酚(均为分析纯):广东光华科技股份有限公司;氨水(分析纯):兴平市福晨化工科技有限公司;硫酸(98%):四川西陇化学股份有限公司;高氯酸(质量分数70%~72%):云南景锐科技有限公司;蒸馏水:北京屈臣氏蒸馏水有限公司。

1.1.2 仪器与设备

水浴锅(DF-101S):杭州旌斐仪器科技有限公司;紫外光可见分光光度计(UV755B):上海佑科仪器仪表有限公司;超声波清洗仪(JP-060S):深圳洁盟技术股份有限公司;电子天平(EL 104)、pH计(FE 28):梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;电热鼓风干燥箱(PH-240A):上海一恒科学仪器有限公司;多功能粉碎机(DE 200):永康市红太阳机电有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 酶处理麦冬工艺过程

水浴锅预热至设定温度,烧杯中加入蒸馏水、搅拌子,必要时添加缓冲盐并调节pH值。水温达标后,加入经干燥、粉碎并过50目筛的麦冬粉,按比例加入酶,恒温搅拌反应。反应结束后,85℃灭酶30 min,冷却至室温,过滤,滤液喷雾干燥即得麦冬提取物。

1.2.2 检测方法

1.2.2.1 总多糖含量的测定

总多糖含量的测定采用SN/T 4260—2015《出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法》^[16]的方法。

1) 葡萄糖标准曲线的绘制

精密称取10.0 mg经过105℃烘至恒重的葡萄糖标准品,用蒸馏水定容至100 mL,得0.1 mg/mL的葡萄糖标准溶液。精密吸取0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL的葡萄糖标准溶液于试管中,用蒸馏水补至1 mL,摇匀,其浓度分别为0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL;加入5%苯酚溶液1 mL,然后快速加入5.0 mL浓硫酸,反应液静置10 min,摇匀后将各试管至于30℃水浴锅保温20 min,取出,以0 mg/mL葡萄糖标准溶液调零,在波长490 nm处测定各标准溶液的吸光度,以葡萄糖质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标绘制标准曲线,得到回归方程为 $y=0.0108x-0.009$, $R^2=0.9993$ 。

2) 供试品溶液制备

称取样品约0.2 g,用5 mL蒸馏水浸润,加入20 mL

无水乙醇,摇匀,超声提取30 min。8 000 r/min离心5 min弃去上清液,不溶物用10 mL 80%乙醇溶液洗涤,8 000 r/min离心5 min弃去上清液。用50 mL水将不溶物转移至锥形瓶,超声提取30 min,重复两次。冷却至室温,过滤,将上清液转移至250 mL容量瓶中,加水定容,得供试品溶液。吸取0.1 mL供试品溶液于试管中,其余步骤同1.2.2.1中1)方法测定吸光度。试样中总多糖的含量(w ,%)按式(1)计算。

$$w = \frac{m_1 \times V_1}{m_2 \times V_2} \times 0.9 \times 10^{-6} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_1 为从标准曲线上查得样品检测液中的含糖量, μg ; V_1 为样品定容体积,mL; V_2 为比色测定时所移取样品测定液的体积,mL; m_2 为样品质量,g;0.9为葡萄糖换算成葡聚糖的校正系数。

1.2.2.2 总皂苷含量的测定

总皂苷含量的测定采用《中华人民共和国药典-一部》^[17]中的高氯酸显色法。

1) 鲁斯可皂苷元标准曲线

精密称取鲁斯可皂苷元标准品适量,用甲醇制成0.1 mg/mL的鲁斯可皂苷元标准溶液,精密吸取0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 mL于试管中,于水浴锅中挥干,然后加入10 mL高氯酸,摇匀,置80℃热水中保温15 min,取出,然后置于10℃冷水中冷却2 min,以0标准溶液调零,在波长397 nm处测定各标准溶液的吸光度,以鲁斯可皂苷元浓度为横坐标,吸光度为纵坐标绘制标准曲线,得到回归方程为 $y=0.0016x-0.0061$, $R^2=0.9991$ 。

2) 供试品溶液制备

称取样品约3.0 g,加入甲醇50 mL,加热回流2 h,放冷,用甲醇补足减少的质量,摇匀,过滤,取续滤液25 mL,回收溶剂至干,残渣加水10 mL溶解,用饱和正丁醇振摇提取5次,每次10 mL,合并正丁醇。然后用40%氨水洗涤2次,每次5 mL,弃去氨水,正丁醇蒸干。残渣用80%甲醇溶解,转移至50 mL容量瓶中,定容,得供试品溶液。精密量取供试品溶液2~5 mL于试管中,其余步骤同1.2.2.2中1)方法测定吸光度。试样中总皂苷的含量(X ,%)按式(2)计算。

$$X = \frac{m_1 \times V_1}{m_2 \times V_2} \times 2 \times 10^{-6} \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为从标准曲线上查得样品检测液中总皂苷含量, μg ; V_1 为样品定容体积,mL; V_2 为比色测定时所移取样品测定液的体积,mL; m_2 为样品质量,g;2为取续滤液一半量的校正系数。

1.2.3 单因素试验

称取麦冬粉20 g,固定料液比1:20(g/mL)、温度45℃、pH5.0、时间2.5 h,分别考察纤维素酶添加量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%)、果胶酶添加量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%)、复合酶(纤维素酶与果胶酶)

质量比(1:3、1:2、1:1、2:1、3:1)、复合酶添加量(1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%)、料液比[1:10、1:15、1:20、1:25、1:30 (g/mL)]、温度(35、40、45、50、55 ℃)、pH 值(4.0、4.5、5.0、5.5、6.0)、时间(1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 h)对麦冬总多糖和总皂苷提取的影响。

1.2.4 正交试验设计

根据单因素试验结果,选择复合酶添加量(A)、温度(B)、pH 值(C)和时间(D)进行四因素三水平正交试验,对麦冬总多糖和总皂苷的提取工艺进行优化,因素与水平设计见表1。

表1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A 复合酶添加量/%	B 温度/℃	C pH 值	D 时间/h
1	2.5	45	4.5	2.5
2	3.0	50	5.0	3.0
3	3.5	55	5.5	3.5

1.2.5 工艺验证

根据正交试验的结果,得到最优的工艺参数,根据此参数进行3次平行试验验证。另外设置水提组作为对照。

1.3 数据处理

采用 SPSS 26.0 进行数据处理,Orign 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 不同酶对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

不同酶对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响如图1所示。

由图1可知,麦冬总多糖和总皂苷的含量均随酶添加量的增加而增加。但纤维素酶对于麦冬总多糖的提取效果更明显;而果胶酶对麦冬总皂苷的提取更明显。纤维素酶能特异性水解纤维素,破坏细胞壁结构,

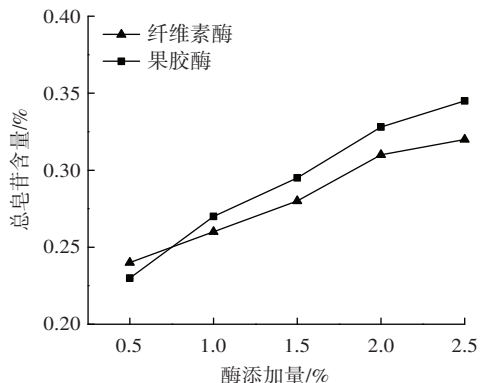


图1 不同酶添加量对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

Fig.1 Effects of different enzyme addition amounts on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

增加通透性,使总多糖更容易释放,因此纤维素酶有助于总多糖的提取^[18];而麦冬皂苷常与果胶或其相连成分结合,果胶酶降解果胶后,可解除这种黏合作用,进一步增加细胞壁通透性,利于皂苷溶出^[19]。因此,为兼顾总多糖和总皂苷的提取,尝试以不同比例的纤维素酶和果胶酶进行处理提取。

2.1.2 不同复合酶质量比对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

不同复合酶质量比对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响见图2。

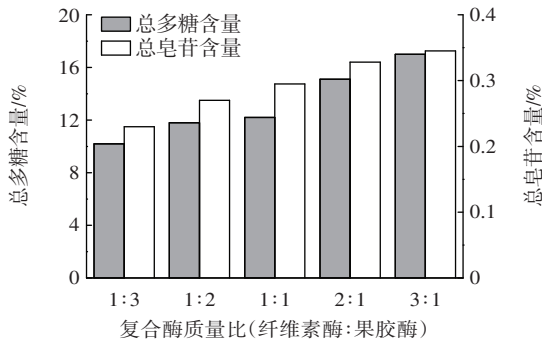
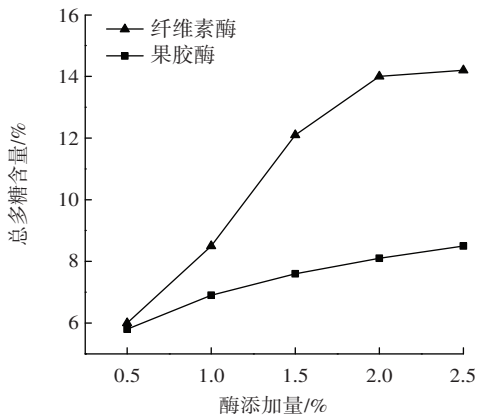


图2 不同复合酶质量比对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

Fig.2 Effects of different enzyme combination ratios on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

由图2可知,在复合酶体系中,纤维素酶和果胶酶的协同作用对总多糖和总皂苷的提取至关重要。当纤维素酶比例较高时,其对细胞壁纤维素的分解作用占据主导地位,为总多糖的溶出创造了更有利的条件,因此总多糖含量随纤维素酶比例增加而显著提升。而当纤维素酶与果胶酶质量比为3:1时,两种酶的协同效应达到最佳,果胶酶对果胶的分解作用进一步破坏了细胞壁的完整性,使得总皂苷能够更充分地释放出来,从而实现了总皂苷提取效率的最优化。



2.1.3 复合酶添加量对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

复合酶添加量对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响见图3。

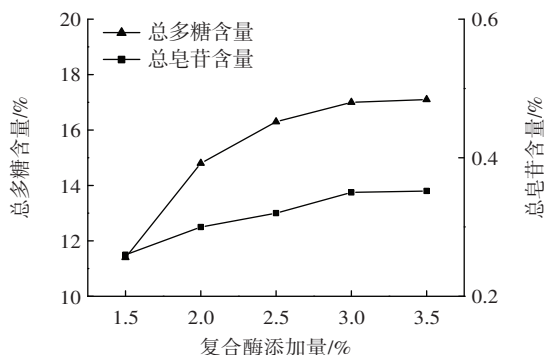


图3 复合酶添加量对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

Fig.3 Effects of compound enzyme dosage on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

由图3可知,当纤维素酶:果胶酶质量比为3:1时,麦冬总多糖和总皂苷的含量影响均随复合酶添加量的增加而增加,当复合酶添加量为3.0%时,两者均趋于稳定。复合酶添加量的增加意味着更多的酶活性分子参与到底物的催化反应中,能够更高效地分解细胞壁,促进总多糖和总皂苷的溶出。然而,当复合酶添加量达到一定程度后,细胞壁结构已经被充分破坏,继续增加复合酶添加量并不能进一步提高提取率,反而可能导致酶之间的相互竞争以及不必要的成本增加,因此选择复合酶添加量2.5%、3.0%、3.5%进行正交试验优化。

2.1.4 料液比对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

料液比对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响见图4。

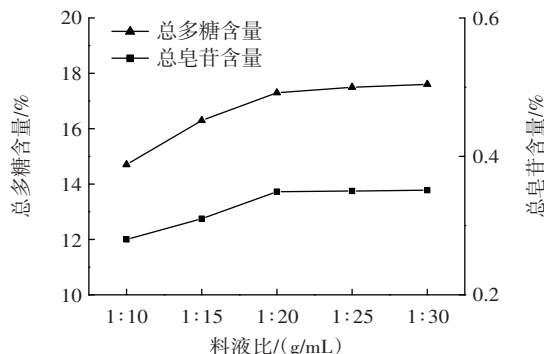


图4 料液比对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

Fig.4 Effects of solid-to-liquid ratio on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

料液比直接影响底物与酶之间的接触面积和反应体系的传质效率。一般情况下,溶剂添加量越高,底物与酶的接触空间越大,反应效率越高,与此同时,溶剂

添加量的增加也会导致后续的干燥成本的增加,并降低提取液中目标成分的浓度。由图4可知,当料液比在1:20 (g/mL)时,反应趋于平衡,因此确定料液比为1:20 (g/mL)。

2.1.5 温度对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

温度对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响见图5。

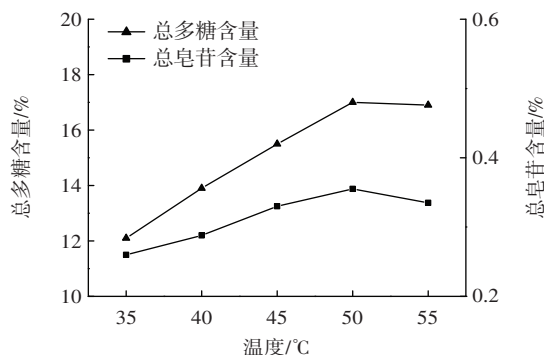


图5 温度对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

Fig.5 Effects of temperature on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

由图5可知,在适宜的温度下,酶有较高的活性,当温度在50℃时,麦冬总多糖和总皂苷的含量均最高,说明纤维素酶和果胶酶的活性达到最佳,能够高效地分解细胞壁成分,实现总多糖和总皂苷的最大化提取。因此选择温度45、50、55℃进行正交试验优化。

2.1.6 pH值对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

pH值对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响见图6。

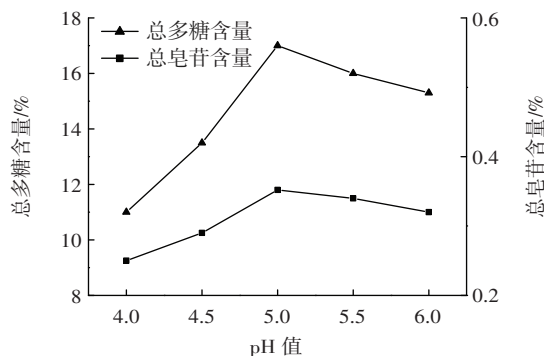


图6 pH值对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

Fig.6 Effects of pH value on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

由图6可知,pH值的大小同样影响酶的活性,麦冬总多糖和总皂苷的含量随着pH值的增加呈现先增加后减小的趋势,当pH值为5.0时,麦冬总多糖和总皂苷的含量均最高,因此选择pH值4.5、5.0、5.5进行正交试验优化。

2.1.7 时间对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响

时间对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响见图7。

由图7可知,随着反应时间的延长,酶与底物有足

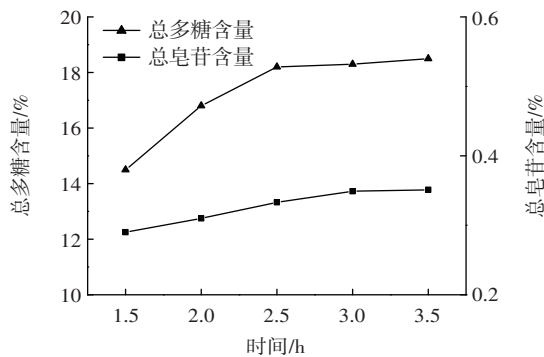


图 7 时间对麦冬总多糖和总皂苷提取效果的影响
Fig.7 Effects of time on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

够的时间进行充分的接触和反应,总多糖和总皂苷的含量逐渐增加。反应 2.5 h 后,总多糖含量趋于平衡;3.0 h 后,总皂苷含量趋于平衡。说明两者在麦冬组织内存在的形式不一样,其溶出的难易程度也不一样,所需的时间不同。因此选择时间 2.5、3.0、3.5 h 进行正交试验优化。

2.2 正交试验设计结果

麦冬总多糖和总皂苷提取的正交试验结果见表 2,方差分析见表 3、表 4。

由表 2 可知,对比极差 R 值可知,影响总多糖含量的因素从大到小依次是 C>B>A>D,即 pH 值对麦冬总多糖含量影响最大,其次是温度、复合酶添加量 and 时

表 2 麦冬总多糖、总皂苷提取正交试验结果
Table 2 Results of orthogonal experiment on the extraction of total polysaccharides and total saponins from *Ophiopogon japonicus*

序号	因素				总多糖含量/%	总皂苷含量/%
	A 复合酶添加量/%	B 温度/℃	C pH 值	D 时间/h		
1	2.5	45	4.5	2.5	14.5	0.33
2	2.5	50	5.0	3.0	18.1	0.55
3	2.5	55	5.5	3.5	17.8	0.43
4	3.0	45	5.0	3.5	17.7	0.45
5	3.0	50	5.5	2.5	17.9	0.51
6	3.0	55	4.5	3.0	16.2	0.39
7	3.5	45	5.5	3.0	17.5	0.41
8	3.5	50	4.5	3.5	16.8	0.44
9	3.5	55	5.0	2.5	20.3	0.43
总多糖含量	k ₁	16.80	16.57	15.83	17.57	
	k ₂	17.27	17.60	18.70	17.27	
	k ₃	18.20	18.10	17.73	17.43	
	R	1.40	1.53	2.87	0.17	
总皂苷含量	k ₁	0.44	0.40	0.39	0.42	
	k ₂	0.45	0.50	0.48	0.45	
	k ₃	0.43	0.42	0.45	0.44	
	R	0.01	0.10	0.09	0.02	

表 3 麦冬总多糖含量提取回归模型方差分析
Table 3 Analysis of variance of the regression model for the extraction of total polysaccharides from *Ophiopogon japonicus*

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A	5.86	2	2.93	8.88	<0.05
B	0.87	2	0.43	1.30	>0.05
C	35.94	2	17.97	54.45	<0.01
D	0.43	2	0.22	0.67	>0.05
误差	1.30	4	0.33		

表 4 麦冬总皂苷含量提取回归模型方差分析
Table 4 Analysis of variance of the regression model for the extraction of total saponins from *Ophiopogon japonicus*

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A	0.000 9	2	0.000 45	0.90	>0.05
B	0.018 1	2	0.009 05	18.10	<0.01
C	0.012 8	2	0.006 40	12.80	<0.05
D	0.001 1	2	0.000 55	1.10	>0.05
误差	0.002 0	4	0.000 50		

间,由 k 值大小可知,最优的因素水平组合为 A₃B₃C₂D₁,即复合酶添加量 3.5%、温度 55℃、pH5.0、时间 2.5 h。而影响总皂苷含量的因素从大到小依次是 B>C>D>A,即温度对麦冬总皂苷含量影响最大,其次是 pH 值、时间和复合酶添加量,最优的因素水平组合为 A₂B₂C₂D₂,即酶添加量为 3.0%、温度 50℃、pH5.0、时间 3.0 h。

由表 3 可知,pH 值对麦冬总多糖含量有极显著影响(P<0.01),可能与其通过调节酶活性和多糖电离状态有关。在酸性条件下,纤维素酶和果胶酶的酶活最高,同时多糖分子的电离程度增加,与细胞壁的结合力减弱,有利于多糖的溶出。其次复合酶添加量对麦冬总多糖含量有显著影响(P<0.05),这与单因素试验的结果一致,复合酶添加量增加,提高对细胞壁的分解能力,从而增加总多糖的提取率。而温度和时间则对麦冬总多糖含量影响不显著(P>0.05),可能在所选的温度范围内,对酶活无太大的影响变化。而时间上可能均已达到反应平衡状态,延长或缩短时间对含量的影响较小。

由表 4 可知,温度对麦冬总皂苷含量有极显著影响(P<0.01)。温度一方面影响酶活,另一方面则可能影响皂苷的溶解度。pH 值对麦冬总皂苷含量有显著影响(P<0.05),同时,pH 值除了影响酶活,还会影响皂苷的解离状态,在不同 pH 值条件下,皂苷分子的电离程度不同,其在水中的溶解度和与细胞壁的结合力也会有所不同。复合酶添加量和时间对麦冬总皂苷含量影响不显著(P>0.05),可能在所选的复合酶添加量和反应时间内已基本满足麦冬总皂苷的提取。

为同时兼顾总多糖和总皂苷的提取效率,确定麦

冬提取的最优工艺为复合酶添加量 3.5%、温度 50℃、pH5.0、时间 3.0 h。在此工艺条件下,总多糖和总皂苷含量均能达到较高的水平,实现了两种活性成分提取的平衡和优化。

2.3 验证试验

为进一步验证最优工艺的可靠性,以最佳的工艺参数进行 3 次平行试验,并以水提作为对照。结果显示,试验组总多糖含量为(18.70±0.08)%,总皂苷含量为(0.52±0.02)%。水提组总多糖含量为 11.30%,总皂苷含量为 0.28%。经过工艺优化,对比传统的热热水提取,总多糖含量提升了 65.49%,总皂苷含量提升了 85.71%。

验证试验结果充分证明优化后的酶法提取工艺在提高麦冬总多糖和总皂苷含量方面的明显优势。与传统水提法^[20]相比,酶法提取通过利用纤维素酶和果胶酶对植物细胞壁的协同分解作用,能够更有效地破坏细胞壁结构,释放出更多的活性成分。这不仅显著提高了提取效率,还减少了提取时间,降低了能源消耗和生产成本,为麦冬的工业化提取提供了更加高效、经济、环保的解决方案。

3 结论

本研究从酶的种类进行探究,发现纤维素酶对麦冬总多糖的提取效果更好,而果胶酶则对麦冬总皂苷提取更有效;当纤维素酶与果胶酶质量比为 3:1 时,总多糖和总皂苷含量最高,经过单因素和正交试验优化了麦冬总多糖和总皂苷的提取工艺,最佳工艺参数为复合酶添加量 3.5%、温度 50℃、pH5.0、时间 3.0 h,在此工艺条件下麦冬总多糖和总皂苷的含量对比传统水提法分别提高了 65.49% 和 85.71%。相对于传统的高温水提或有机溶剂提取,容易造成能源消耗和环境污染,本研究提供了一种绿色环保且高效的提取方法,工艺稳定,为麦冬的绿色开发和加工提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] CHEN M H, CHEN X J, WANG M, et al. *Ophiopogon japonicus*—A phytochemical, ethnomedicinal and pharmacological review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 181: 193-213.
- [2] 顾志荣, 李芹, 吕鑫, 等. 川麦冬、浙麦冬中 8 种成分测定及综合质量评价[J]. 中成药, 2021, 43(6): 1513-1520.
GU Zhirong, LI Qin, LÜ Xin, et al. Determination and comprehensive quality evaluation of eight constituents in *Ophiopogon japonicus* in Sichuan and Zhejiang Provinces[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2021, 43(6): 1513-1520.
- [3] WANG L, JIANG X L, ZHANG W M, et al. *Homo*-aro-cholestane, furostane and spirostane saponins from the tubers of *Ophiopogon japonicus*[J]. Phytochemistry, 2017, 136: 125-132.
- [4] FANG J C, WANG X X, LU M X, et al. Recent advances in polysaccharides from *Ophiopogon japonicus* and *Liriope spicata* var. *prolifera*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 1257-1266.
- [5] CHEN Y T, MA L L, YAN Y Z, et al. *Ophiopogon japonicus* polysaccharide reduces doxorubicin-induced myocardial ferroptosis injury by activating Nrf2/GPX4 signaling and alleviating iron accumulation[J]. Molecular Medicine Reports, 2024, 31(2): 36.
- [6] WU Z W, ZHAO X K, MIYAMOTO A, et al. Effects of steroidal saponins extract from *Ophiopogon japonicus* root ameliorates doxorubicin-induced chronic heart failure by inhibiting oxidative stress and inflammatory response[J]. Pharmaceutical Biology, 2019, 57(1): 176-183.
- [7] 苏征, 董轲, 丁文元, 等. 麦冬皂苷 D 在小鼠压力超负荷心肌肥厚中的作用研究[J]. 中国体外循环杂志, 2024, 22(6): 504-509, 515.
SU Zheng, DONG Ke, DING Wenyuan, et al. Study on the role of ophiopogonin D in pressure overload-induced myocardial hypertrophy in mice[J]. Chinese Journal of Extracorporeal Circulation, 2024, 22(6): 504-509, 515.
- [8] 陈志国, 杜瑞娟, 卞华. 麦冬皂苷 D 抗心血管疾病作用机制研究进展[J]. 中成药, 2023, 45(9): 2978-2986.
CHEN Zhiguo, DU Ruijuan, BIAN Hua. Research progress on the anti-cardiovascular mechanism of *Ophiopogon japonicus* saponin D[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(9): 2978-2986.
- [9] 陈奕澹, 张雅心, 江伟豪, 等. 麦冬皂苷 D 对高脂饲养 ApoE^{-/-}小鼠血脂及肠道菌群的影响[J]. 中草药, 2020, 51(13): 3501-3508.
CHEN Yihao, ZHANG Yaxin, JIANG Weihao, et al. Effect of ophiopogonin D on serum lipids and intestinal flora in ApoE^{-/-} mice with high-fat diet[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(13): 3501-3508.
- [10] LIU Q, LU J J, HONG H J, et al. *Ophiopogon japonicus* and its active compounds: A review of potential anticancer effects and underlying mechanisms[J]. Phytomedicine, 2023, 113: 154718.
- [11] DING L, SHANGGUAN H Z, WANG X, et al. Extraction and purification of *Ophiopogon japonicus* polysaccharides, structural characterization, biological activity, safety evaluation, chemical modification and potential applications: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140282.
- [12] 吴舜彬, 蔡苗. 麦冬多糖的提取技术、生物学活性及多领域应用研究进展[J]. 广州化工, 2024, 52(24): 17-22.
WU Shunbin, CAI Zhuo. Progress on the extraction process, biological activity and application of *Ophiopogon japonicus* polysaccharide[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(24): 17-22.
- [13] 张玉, 张妍, 洪挺, 等. 麦冬多糖提取分离及结构鉴定方法研究进展[J]. 今日药学, 2025, 35(2): 146-154.
ZHANG Yu, ZHANG Yan, HONG Ting, et al. Progress on the extraction, isolation and structural characterization of *Ophiopogon japonicus* polysaccharides[J]. Pharmacy Today, 2025, 35(2): 146-154.
- [14] 解千. 酶法分离提取麦冬寡糖和麦冬皂苷[D]. 大连: 大连工业大学, 2012.
XIE Qian. Extraction and separation of oligosaccharides and *Ophiopogon japonicus* saponin by enzyme[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2012.
- [15] 张雪莲, 刘宇飞, 赵劲松. 响应面法优化湖北麦冬多糖提取工艺及其复合饮料研制[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(22): 133-138.
ZHANG Xuelian, LIU Yufei, ZHAO Jinsong. Optimization of the extraction method of polysaccharide from *Liriope spicata* by response surface methodology and the formula development of its compound beverage[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(22): 133-138.

- nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(9): 102-111.
- [16] 陈小爱, 蔡惠钿, 刘静宜, 等. 基于电子鼻、GC-MS 和 GC-IMS 技术分析老香黄发酵期间的挥发性成分变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 70-80.
- CHEN Xiao'ai, CAI Huitian, LIU Jingyi, et al. Analysis of volatile components in Laoxianghuang during fermentation by electronic nose, GC-MS and GC-IMS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 70-80.
- [17] 贝翠平, 柳艳霞, 赵改名, 等. 基于电子鼻与 GC-MS 分析精氨酸-葡萄糖美拉德反应体系挥发性风味成分的差异性[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(6): 146-154.
- BEI Cuiping, LIU Yanxia, ZHAO Gaiming, et al. Analysis of the difference of volatile flavor components of arginine-glucose Maillard reaction system based on electronic nose and GC-MS[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(6): 146-154.
- [18] 曹伟峰, 张悦妍, 向情儒, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 341-348.
- CAO Weifeng, ZHANG Yueyan, XIANG Qingru, et al. Analysis of the effect of vacuum cooling on the flavor of sauce beef based on HS-SPME-GC-MS and GC-IMS combined with electronic nose[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 341-348.
- [19] 赵慧君, 雷炎, 胡事成, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 技术对不同地区腌制大头菜挥发性物质的评价[J]. *中国调味品*, 2020, 45(5): 69-74.
- ZHAO Huijun, LEI Yan, HU Shicheng, et al. Evaluation of volatile substances in pickled mustard root in different regions based on electronic nose and GC-MS technology[J]. *China Condiment*, 2020, 45(5): 69-74.
- [20] NI J B, BI Y X, VIDYARTHI S K, et al. Non-thermal electrohydrodynamic (EHD) drying improved the volatile organic compounds of *Lotus bee pollen* via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 176: 114480.
- [21] NIYOMVONG N, SRITAWAN R, KEABPIMAI J, et al. Comparison of the chemical properties of vinegar obtained via one-step fermentation and sequential fermentation from dragon fruit and pineapple[J]. *Beverages*, 2022, 8(4): 74.
- [22] 顾晨, 魏文莉, 马海乐, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 技术分析不同干燥方式对香葱挥发性物质的影响[J]. *中国调味品*, 2022, 47(12): 148-153.
- GU Chen, WEI Wenli, MA Haile, et al. Analysis of the effect of different drying methods on the volatile substances of chives based on electronic nose and GC-MS technology[J]. *China Condiment*, 2022, 47(12): 148-153.
- [23] 李官丽, 伍淑婕, 罗秀娟, 等. 基于 SPME-GC-MS 萃取荸荠挥发性风味物质研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(14): 70-78.
- LI Guanli, WU Shujie, LUO Xiujuan, et al. Extraction of volatile flavor compounds from Chinese water chestnut based on SPME-GC-MS[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(14): 70-78.
- [24] 吴昕怡, 田浩, 牛之瑞, 等. 基于熵权的 TOPSIS 和聚类分析评价方法的发酵辣椒品种适用性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(22): 7314-7322.
- WU Xinyi, TIAN Hao, NIU Zhirui, et al. Study on applicability of fermented pepper varieties based on entropy weight TOPSIS and cluster analysis[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(22): 7314-7322.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2025-03-25

(上接第 144 页)

- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法: SN/T 4260—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Determination of crude polysaccharides in plant source foods for export Phenol-sulfuric acid colorimetry: SN/T 4260—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [17] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:162.
- Pharmacopoeia Commission of the People's Republic of China. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Part I[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 162.
- [18] 汪建红, 李迪. 纤维素酶法提取荸荠皮中多糖的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(5): 248-251, 257.
- WANG Jianhong, LI Di. Study on the extraction technology of polysaccharide in water chestnut peel by cellulase[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(5): 248-251, 257.
- [19] 张兴山, 刘翠花. 中药活性成分的生物酶法提取与化学成分分析[J]. *山西化工*, 2025, 45(4): 110-112.
- ZHANG Xingshan, LIU Cuihua. Biological enzymatic extraction and chemical composition analysis of active ingredients in traditional Chinese medicine[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2025, 45(4): 110-112.
- [20] 尹菲, 周博宇, 张晶莹, 等. 麦冬水提取物对运动小鼠耐力的影响[J]. *中国卫生工程学*, 2020, 19(2): 180-182.
- YIN Fei, ZHOU Boyu, ZHANG Jingying, et al. Effect of *Ophiopogon japonicus* water extract on endurance of exercise mice[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2020, 19(2): 180-182.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2025-05-23