齐鲁工业大学学报 第40卷 第5期 2026年10月出版
JOURNAL OF QILU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Vol.40 No.5 Oct.2026
DOI:10.16442/j.cnki.qlgydxxb.2026.05.002 【食品与生物工程】

复合生物酶法提取川射干中鸢尾黄素工艺的研究

郭淑敏[1],马晓洁[1],侯云峰[2],丁 烽[1],孙登岳[1],尚小雷[2],李丕武[1*]
1.齐鲁工业大学(山东省科学院) 绿色造纸与资源循环全国重点实验室,山东 济南 250353;
2.山东金铸基药业有限公司,山东 济南 271100

摘要:川射干作为清热解毒的常用中药,其主要活性成分鸢尾黄素具有抗炎、抗病毒和抗氧化等多种显著药理活性。传统提取方法如热水提取和有机溶剂法普遍存在提取效率低、能耗大、环境污染严重等问题。生物酶法因其条件温和、特异性强、环境相容性高等优势,已成为实现绿色提取的重要途径。本研究旨在建立并优化基于复合生物酶解的川射干中鸢尾黄素的提取工艺。通过单因素实验,系统考察了酶浓度、pH、温度等关键参数,筛选高效酶种。结果表明,最优复合酶组合为果胶酶、木聚糖酶与蛋白酶,最佳工艺参数为:酶复配比为 m(果胶酶):m(木聚糖酶):m(蛋白酶)=1:1:2、酶添加质量分数设定为绝干样品质量的4%、pH为7、温度50 ℃、时间4 h、料液比1 g:10 mL。在此条件下,鸢尾黄素的转化率达到8.88%。本研究验证了生物酶法在川射干鸢尾黄素提取中的高效性与环保性,为其工业化应用提供了可靠的技术支持。

关键词:川射干;鸢尾黄素;生物酶法;酶解提取;工艺优化
中图分类号:R917 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-2792(2026)05-09-08

A complex enzymatic extraction technology for tectorigenin from *Iris tectorum* Maxim

GUO Shumin[1],MA Xiaojie[1],HOU Yunfeng[2],DING Feng[1],SUN Dengyue[1],SHANG Xiaolei[2],LI Piwu[1*]
1.Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences)
State Key Laboratory of Green Papermaking and Resource Recycling,Jinan 250353,China;
2.Shandong Jinzhuji Pharmaceutical Co.,Ltd.,Jinan 271100,China

Abstract:As a commonly used traditional Chinese medicine for clearing heat and detoxification,the main active component,tectorigenin,exhibits significant pharmacological activities such as anti-inflammatory,antiviral,and antioxidant effects.Traditional extraction methods like hot water extraction and organic solvent extraction generally suffer from low efficiency,high energy consumption,and severe environmental pollution.Due to its mild conditions,high specificity,and excellent environmental compatibility,the enzymatic method has become an important approach for achieving green extraction.This study aims to establish and optimize the extraction process of tectorigenin from *Iris tectorum* based on complex enzymatic hydrolysis.Through single-factor experiments,key parameters such as enzyme concentration,pH,temperature were systematically investigated to screen for highly efficient enzyme types.The results showed that the optimal composite enzyme combination consisted of pectinase,xylanase,and protease,with the best process parameters as follows:enzyme ratio of pectinase,xylanase,and protease was 1∶1∶2,the enzyme loading was 4% of the absolute dry substrate weight,pH 7,temperature 50 ℃,time 4 h,and solid-to-liquid

收稿日期:2025-11-28 **网络出版时间**:2026-10-31
基金项目:齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合试点工程重大创新专项(2025ZDZX14);2023“海右计划”产业领军人才支持工程项目(CYLJ20231811336)
作者简介:郭淑敏,硕士生;研究方向:微生物酶应用技术
* **通信作者**:李丕武,博士、教授;研究方向:微生物酶应用、生物智能制造装备;piwuli@qlu.edu.cn

ratio 1 g∶10 mL.Under these conditions,the conversion rate of tectorigenin reached 8.88%.This study validates the efficiency and environmental friendliness of the enzymatic method for extracting tectorigenin from *Iris tectorum*, providing reliable technical support for its industrial application.

Key words:*Iris tectorum* Maxim.;tectorigenin;enzymatic method;enzymatic extraction;process optimization

川射干(*Iris tectorum* Maxim.)为鸢尾科植物鸢尾的干燥根茎,是川产道地药材,具有清热解毒、祛痰利咽之功效[1-3]。现代药理研究证实,其主要的活性成分为异黄酮类化合物[4],其中鸢尾黄素(Tectorigenin)因其显著的抗炎、抗病毒和抗肿瘤活性而备受关注[5]。相较于其糖苷形式(射干苷),鸢尾黄素在生物体内吸收更迅速、药效更直接,尤其在畜禽健康养殖领域展现出良好的应用前景[6]。然而,川射干中天然游离鸢尾黄素的含量较低,其高效获取成为制约其深度开发和利用的关键瓶颈。

目前,鸢尾黄素的提取主要依赖于传统提取法,传统提取方法(如浸渍法、索氏提取法)虽然设备简单,但普遍存在提取效率低、溶剂消耗大、时间长、且高温易导致热敏性成分降解等问题。例如,研究表明采用索氏提取法提取辣木(*Moringa oleifera*)叶子时总酚类(含黄酮)得率较低[7];在提取杜荆(*Vitex negundo*)叶片中的鸢尾黄素时,浸渍法提取质量分数为 1.02%,索氏提取法的为 1.075%,而回流法可达 6.34%[8];类似地,对假杜荆(*Vitex pseudonegundo*)叶片的提取中,浸渍法提取鸢尾黄素质量浓度仅为 9.47 μg/mL,而回流法可达 21.58 μg/mL[9]。这些方法通常选择性较差,提取物为复杂混合物,目标活性成分(如鸢尾黄素)的实际提取率受植物原料和工艺条件影响显著,且通常需要进一步繁琐的纯化步骤[7]。因此,开发高效、绿色的新型提取技术具有重要意义。

生物酶法作为绿色生物制造的关键技术之一,在植物活性成分提取领域显示出巨大潜力。其通过特异性酶解植物细胞壁及胞内结合成分,在温和条件下释放目标物,具有条件温和、选择性高、环境友好等突出优势[10]。目前,酶辅助提取技术已在多种中药材黄酮类成分的提取中得到成功应用[11],但针对川射干,特别是旨在定向、高效获取鸢尾黄素的酶法提取研究,尚未见系统报道。

当前酶法提取中药成分的研究多集中于总黄酮的提取[12],而针对药用功效更为显著的鸢尾黄素,其酶法提取工艺研究尚不充分。尤其是基于其在药材中可能存在的结合态(如与细胞壁多糖或蛋白质载体结合),尚未见有针对性的复合酶协同提取工艺的系统研究。因此,本研究旨在通过构建针对性的复合酶体系,优化提取工艺,实现鸢尾黄素的高效释放与转化,填补该成分在酶法提取工艺方面的研究空白。

本研究基于文献中关于异黄酮类成分存在形式的报道,提出以“高效转化与释放川射干中鸢尾黄素”为研究目标,构建了“果胶酶、木聚糖酶、蛋白酶”三酶复合作用体系,即以果胶酶与木聚糖酶协同打破中药细胞壁外围屏障,而蛋白酶则靶向水解细胞内可能束缚鸢尾黄素的蛋白质载体,从而系统性地突破提取限制[12-13],通过实验,确立最终提取工艺为:$m_{果胶酶}$∶$m_{木聚糖酶}$∶$m_{蛋白酶}$=1∶1∶2 为酶组合,在加酶质量分数(以底物绝干质量计)4%、pH 7、50 ℃、料液比 1 g∶10 mL 条件下反应 4 h 的最佳提取工艺。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

原料:川射干,川射干药材源自其道地产区四川,由合作单位山东金铸基药业有限公司采购并提供。

鸢尾黄素标准样品(纯度≥98%,来源:成都曼斯特生物科技有限公司,批号 MUST-24102617)。

主要仪器(表 1)与试剂(表 2):

表 1 主要仪器

仪器名称	仪器型号	生产厂家
电子分析天平	GMC3002	南京伯尼塔科学仪器有限公司
精密电子天平	BCE224I-1CCN	赛多利斯科学仪器(北京)有限公司
电热恒温水浴锅	DK-S26	上海精宏实验设备有限公司
离心机	H1650	上海菌森分离技术有限公司
pH 计	C-600	贝尔分析仪器(大连)有限公司
液相色谱仪	LC-20A	岛津企业管理(中国)有限公司
循环水真空泵(SHⅢ)	CM-1.0A	上海贤德实验仪器有限公司

表 2　主要试剂

试剂名称	规格	生产厂家
中性纤维素酶	3 000 U/g 固态	山东隆科特酶制剂有限公司
中性蛋白酶	3 000 U/g 固态	山东隆科特酶制剂有限公司
木聚糖酶(Ⅱ)	3 000 U/g 固态	山东隆科特酶制剂有限公司
果胶酶(Ⅱ)	3 000 U/g 固态	山东隆科特酶制剂有限公司
乙醇(无水乙醇)	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
甲醇	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
磷酸	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
纯净水	GB 17323	娃哈哈宏振饮用水有限公司
十二水合磷酸氢二钠	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
一水合柠檬酸	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
混合磷酸盐	分析纯	上海虹北试剂有限公司

1.2　实验方法

1.2.1　射干苷含量测量

供试品溶液取川射干粉末(过 4 号筛)约 0.10 g,精密称定,放入 25 mL 具塞锥形瓶中,用移液管精密加入甲醇 25 mL,称量,80 ℃水浴加热回流 1 h,放至冷却,再次称量,然后用甲醇进行补足失去的量,摇匀,用 0.22 μm 微孔滤膜进行滤过,取续滤液,即得。

样品中射干苷含量测定参照周洪旭等[14]的检测方法,采用射干苷标准样品(纯度≥98%,来源:成都曼斯特生物科技有限公司,批号:MUST-24081214)进行定量。

1.2.2　鸢尾黄素提取量测定

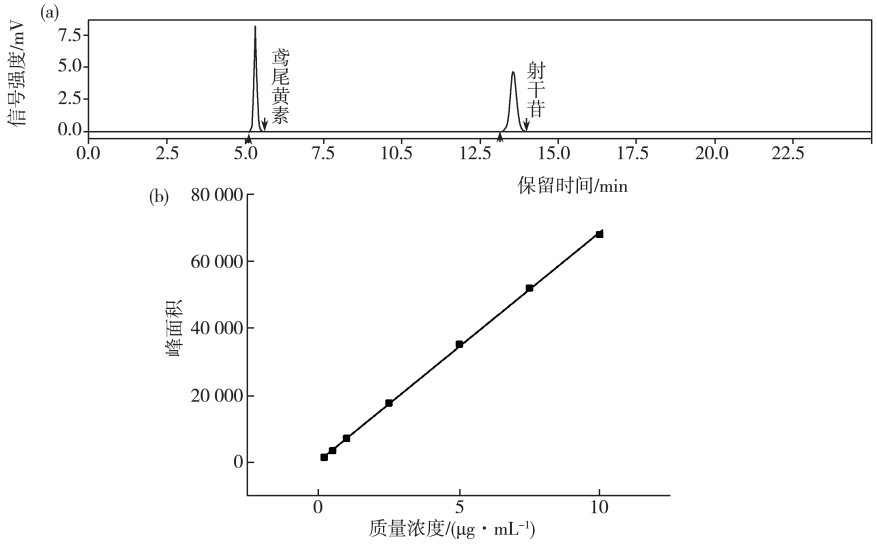
(1)色谱条件:采用 Kromasil C18 色谱柱(250 mm×4.6 mm×5 μm),流动相为水-甲醇(体积比为 45:55)(磷酸调 pH 为 3),流速为 0.8 mL·min^{-1},柱温 35 ℃,检测波长 265 nm,进样量 20 μL。

(2)鸢尾黄素标准样品贮备液的制备:精密称取适量干燥至恒重的鸢尾黄素标准样品,加甲醇溶解,制成鸢尾黄素质量浓度为 500 μg/mL 的贮备液。

(3)系统适应性实验:按“1.2.2(1)”项下色谱条件,分别精密吸取“1.2.2(2)”项下溶液与“1.2.1”项下溶液各 20 μL 进样测定记录色谱图。鸢尾黄素与相邻色谱峰均完全分离,理论塔板数以鸢尾黄素峰计算,均不低于 4 000。高效液相色谱图见图 1。

(4)线性考察:取适量贮备液,用流动相分别稀释成鸢尾黄素质量浓度为 10、7.5、5.0、2.5、1.0、0.5、0.2 μg/mL 的溶液,取 20 μL 进样,按照卿钦等的方法进行检测[15],以峰面积(Y)对进样质量浓度(X,μg/mL)进行线性回归考察。

回归方程为 Y=303.000 64 + 6 831.647 77X,R^2=0.999 67,线性回归结果表明,鸢尾黄素在 0.2~10 μg/mL 质量浓度范围内线性关系良好。



注:(a)标准样品溶液高效液相色谱图;(b)鸢尾黄素校准曲线。

图 1　鸢尾黄素分析图

1.2.3 酶解实验方案

(1)实验用酶的选择

在参考国内外研究文献[12,16],结合川射干作为根茎类药材细胞壁富含果胶、半纤维素等成分的特点,选定蛋白酶、纤维素酶、果胶酶、木聚糖酶进行筛选;此外,在预实验基础上,确定酶解时间为 4 h。

每组实验准确称取绝干质量为 10.00 g 川射干,在设定酶解条件(酶添加质量分数设定为绝干样品质量的 2%,料液比 1 g∶10 mL,基于商品酶最适温度和 pH)下反应 4 h,50 ℃水浴维持温度,煮沸终止酶活。

预实验表明,鸢尾黄素在 100 ℃、10 min 内热稳定性良好,煮沸终止酶活未导致其明显降解。

使用磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲体系统维持反应体系 pH,磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲体系在 pH 6~7 范围内可为所选酶提供适宜 pH 环境,各酶在此范围内活性较高。

提取液经抽滤、离心(4 ℃,6 000 r/min,3 min)、稀释(原浓度 1/10)和微孔滤膜过滤后,进行高效液相色谱(HPLC)检测[15]。

(2)复合酶复配实验方案

在单一酶的基础上进行复合酶实验,a、b、c、d 分别代表果胶酶、纤维素酶、木聚糖酶、蛋白酶。具体数据设置参见表 3。

表 3 四种酶的复合酶配比

酶	复配质量比
A(a∶b∶c∶d)	2∶1∶1∶1
B(a∶b∶c∶d)	1∶2∶1∶1
C(a∶b∶c∶d)	1∶1∶2∶1
D(a∶b∶c∶d)	1∶1∶1∶2

(3)单因素实验方案

在固定基础参数(pH 6,温度 50 ℃,时间 4 h,酶添加质量分数设定为绝干样品质量的 2%,料液比 1 g∶10 mL 下,分别探讨酶用量、pH、温度对川射干中药效成分提取效果的影响。各因素设 5 个水平,以鸢尾黄素转化率为指标,确定其适宜范围。具体数据设置参见表 4。

表 4 单因素实验设置

单因素	实验组水平				
pH	4	5	6	7	8
温度/℃	30	40	50	60	70
加酶质量分数/%(以底物绝干质量计)	1	2	3	4	5

1.2.4 鸢尾黄素转化率的计算公式

$$转化率=\frac{m_{鸢尾黄素}}{w_{射干苷}\times m_{样品}}\times 100\%。$$

转化率表示射干苷转化为鸢尾黄素的百分比,%;$m_{鸢尾黄素}$表示实际提取得到的鸢尾黄素总质量,mg;$w_{射干苷}$表示每克样品中射干苷的质量,mg/g;$m_{样品}$表示用于检测的样品质量,g。

2 结果与分析

2.1 川射干中射干苷含量

在依据周洪旭等[14]的检测方法对样品川射干检测后,可得样品川射干中射干苷的质量分数为 10.13%(以干品计)。

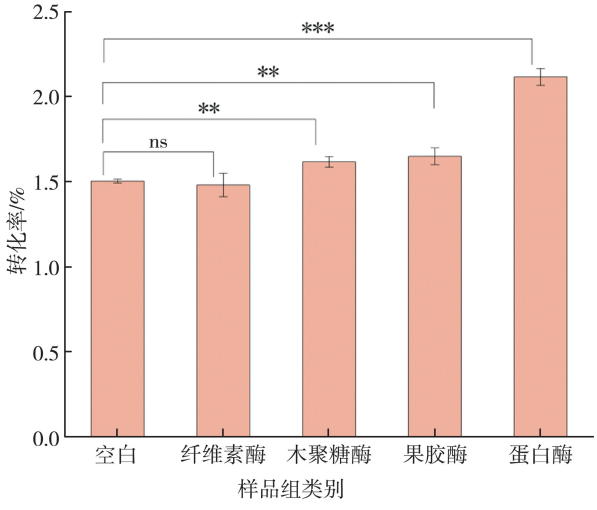
2.2 酶种筛选结果

2.2.1 单一酶的筛选

鸢尾黄素在植物细胞内通常不是以游离形式存在,而是与糖结合形成糖苷(如鸢尾黄苷)[17],并可能被储存在细胞器(如液泡)中[18],或与特定的载体蛋白、储存蛋白结合在一起。蛋白酶在复合体系中表现出显

著提升鸢尾黄素转化率的作用(图 2),这可能与其水解植物基质中蛋白质组分、从而促进目标物释放有关。

纤维素酶 、木聚糖酶 、果胶酶的转化率都与空白组相差不大(图 2),这可能是因为植物细胞壁是一个由多种成分交联而成的复杂网络[16]。单独使用一种细胞壁降解酶,可能无法彻底瓦解这个网络,因而无法有效释放内容物。



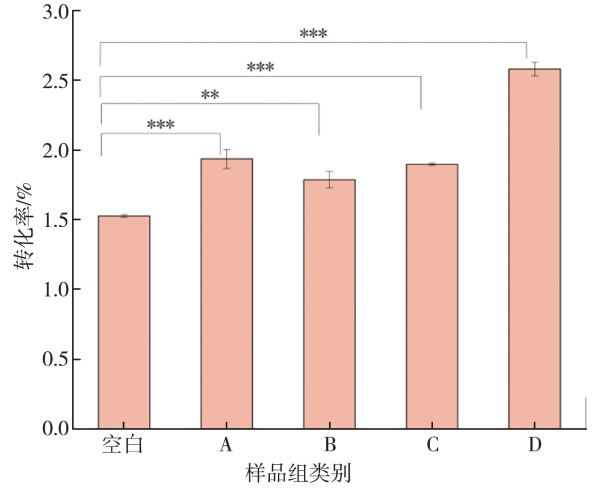
注:ns 表示差异不显著(p>0.05);** 表示差异极显著(p<0.01);*** 表示差异高度显著(p<0.001)。

图 2　单酶鸢尾黄素转化率

2.2.2　复合酶的筛选

采用复合酶对川射干进行酶解实验,结果如图 3 所示,蛋白酶含量高的 D 组复合酶转化率明显高于空白组,此外,复合酶组的转化率普遍高于单一酶组。

无论是单一纤维素酶还是以其为主的复合酶,其转化率均未表现出显著优势,均低于其他酶处理组,甚至单一酶组的转化率与空白对照组的结果相近。



注:** 表示差异极显著(p<0.01);*** 表示差异高度显著(p<0.001)。

图 3　复合酶(四种酶)鸢尾黄素转化率

综上所述,选择蛋白酶、木聚糖酶、果胶酶进行下一步的复配。具体数据设置参见表 5。

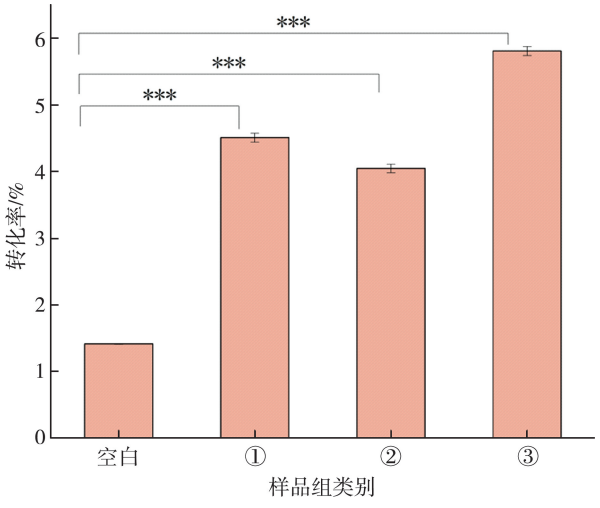
表 5　三种酶的复合酶配比

酶组合种类	复配质量比
①(果胶酶:木聚糖酶:蛋白酶)	2∶1∶1
②(果胶酶:木聚糖酶:蛋白酶)	1∶2∶1
③(果胶酶:木聚糖酶:蛋白酶)	1∶1∶2

如图 4,果 $m_{果胶酶}$∶$m_{木聚糖酶}$∶$m_{蛋白酶}$=1∶1∶2(即③组)提取鸢尾黄素的效果稳定、效率高。3 次重复实验结果显示,③组转化率相对标准偏差(RSD)小于 5%,表明其重现性良好,提取效果稳定。果胶酶和木聚

糖酶主要作用于细胞壁成分,通过降解果胶和木聚糖来破坏细胞外部结构,增加物料通透性,为有效成分的释放创造基础条件。

蛋白酶则有可能通过水解蛋白质载体,高效释放被结合的鸢尾黄素。③组配方将蛋白酶比例提高一倍,正是强化了这一核心释出环节。相比之下,①、②组虽然调整了细胞壁降解酶的比例,但由于未能增强破解蛋白质屏障这一限速步骤的能力,故转化率提升有限。



注:*** 表示差异高度显著(p<0.001)。

图 4 复合酶(3 种酶)鸢尾黄素转化率

2.2.3 单因素实验分析

(1)温度单因素实验

如图 5 所示,在 30~50 ℃区间内,随着温度升高,体系中分子热运动加剧,酶与底物碰撞频率增加,反应速率相应提升,因此转化率呈现逐步上升趋势[19]。

当温度继续升高至 60~70 ℃时,该酶系的转化率并未出现显著下降,仍维持在较高水平。这说明其所含酶组分(尤其是关键蛋白酶)具有较优的热稳定性,能够在较高温度下保持催化构象,不易迅速变性失活[20]。

(2)pH 单因素实验

如图 6 所示,该复合酶体系中各单酶的最适 pH 为中性至弱碱性环境(pH 6~7),在复合酶此条件下转化率达到峰值。

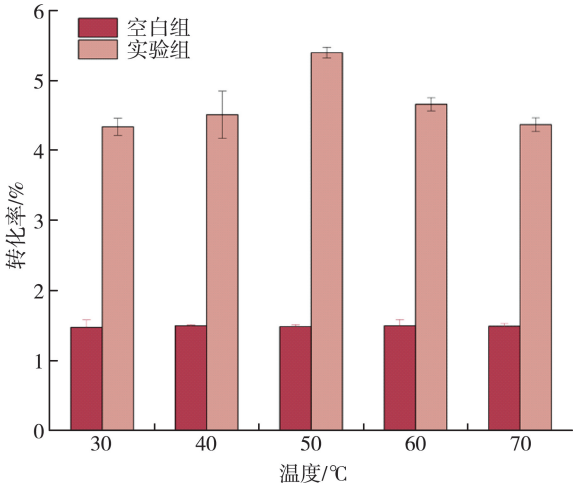


图 5 不同温度下复合酶鸢尾黄素转化率

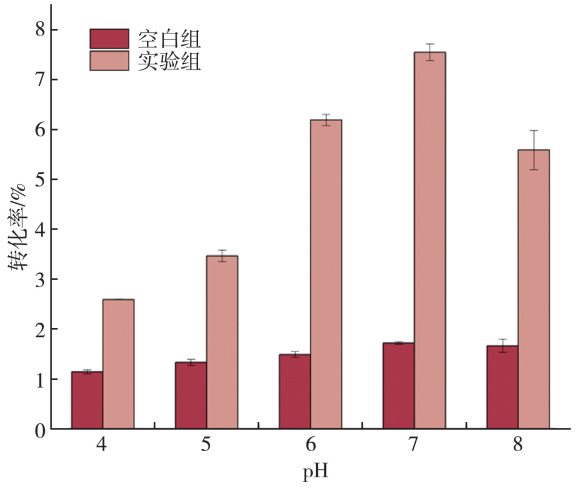


图 6 不同 pH 下复合酶鸢尾黄素转化率

在碱性条件下(pH 8),转化率虽较最佳 pH 范围有所降低,但下降幅度相对有限,表明该酶在偏碱性环境中仍保留相当部分的催化活性。这可能是由于 pH 升高引起了酶分子构象的局部、可逆性调整,导致催化效率略有下降,但并未引发结构的完全失活。

相比之下,在酸性条件下(pH 4~5),酶活受到明显抑制,且不同实验重复间数据波动较大,反映出该环境下酶的结构稳定性较差,催化性能易受干扰,重现性不佳。

综上所述,该复合酶体系在 pH 6~7 时表现出高活性与稳定性,其活性变化可能与构象动力学和底物结合状态的调节密切相关,类似机制在其他酶体系中也具有普遍意义[21]。

(3)酶的添加质量分数单因素实验

素转化率如图 7 所示,在底物充足的条件下,增加酶量可显著提高反应速率和转化率,符合典型酶促反应中酶浓度与反应速度的正比关系。然而,在酶质量分数增至 5% 时,转化率出现明显下降,表现为真实的“高酶量抑制”现象。这一现象可能源于多种机制:一方面,过量酶分子可能因空间位阻、非特异性吸附及酶间竞争而导致活性位点被遮蔽或相互干扰;另一方面,若复合酶系中蛋白酶占比过高,过量蛋白酶可能在降解目标蛋白的同时水解其他关键酶组分,破坏酶系的协同作用。值得指出的是,底物浓度对酶活性具有类似的双向调节作用——低浓度时活性随底物增加而提升,但过高浓度也可能引发“底物抑制”,即过量底物占据酶的非活性位点,反而阻碍催化进程[22]。这说明酶与底物的比例平衡对维持高效催化至关重要,过高或过低的配比均可能导致活性下降,在实际工艺优化中需系统考察酶量、底物浓度及其相互作用的影响。因此,结合实验可得,当酶的添加质量分数为 4%,pH 为 7,温度为 50 ℃,反应时间为 4 h,料液比 1 g∶10 mL 时,复合酶的提取效果最好。

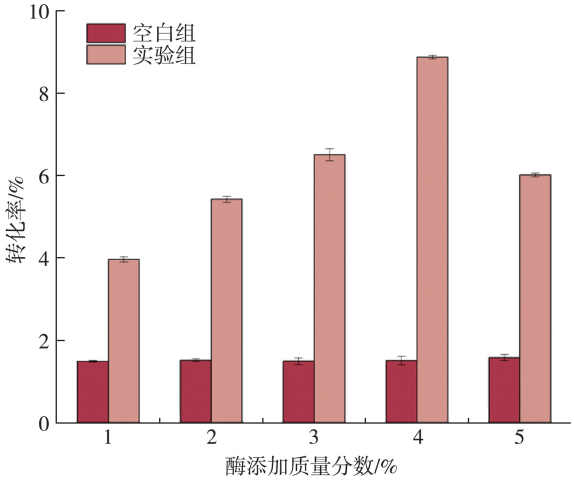


图 7　不同加酶质量分数下复合酶鸢尾黄素转化率

2.3　讨论

本研究通过构建“果胶酶-木聚糖酶-蛋白酶”三酶复合酶协同作用体系,实现了对川射干细胞基质及其成分结合状态的多层次解构。该体系中,果胶酶与木聚糖酶可特异性水解细胞壁多糖组分,改善传质渗透性;蛋白酶则选择性降解与鸢尾黄素结合的蛋白载体,从而促进目标活性成分的释放。多种酶的协同效应克服了单一酶解或常规提取方法的技术局限。

在本研究构建的复合酶体系中,蛋白酶对提升鸢尾黄素转化率具有关键贡献,结合文献中关于异黄酮类成分可能存在于蛋白结合态的报道,推测蛋白酶通过水解相关蛋白载体促进了目标物的释放。未来可进一步开展结合态分析与释放机制研究,以深化对该提取过程的理解。本研究重点在于建立并优化提取工艺,为该成分的高效、绿色制备提供技术基础。

本研究开发了一套高效、稳定且环境相容性良好的提取工艺,显著提高了鸢尾黄素的转化率,为川射干的资源高值化利用提供了可行技术路径。该工艺符合中药绿色制造的发展方向,有助于降低传统提取方式对能源与环境的负担,对促进中药材提取技术的迭代与产业可持续发展具有积极意义。综上所述,本研究聚焦于川射干鸢尾黄素的定向酶法提取,通过创新性的复合酶解策略与工艺系统优化,填补了该领域的研究空白,为该成分的高效、绿色规模化制备奠定了科学基础与技术支撑。

3　结论与展望

3.1　结论

本研究成功建立了一套高效、绿色的复合生物酶法提取川射干中鸢尾黄素的工艺。最优酶组合为 $m_{果胶酶}∶m_{木聚糖酶}∶m_{蛋白酶}=1∶1∶2$,最佳工艺参数为:加酶质量分数 4%、pH 7、50 ℃、4 h、料液比 1 g∶10 mL,该条件下鸢尾黄素转化率达 8.88%。该方法具有条件温和、环境友好、转化率高等优点,具备良好的工业化应用潜力。

工艺优化表明,该复合酶系在中性温和条件下(pH 7,50 ℃)即可实现高效转化,避免了高温和有机溶剂对活性成分的破坏,体现了绿色提取的优势。加酶量 4% 为经济高效点,过量酶可能导致体系抑制,提示在实际应用中需精准控制酶剂量。

与传统方法相比,本工艺不仅提高了鸢尾黄素转化率,还大幅降低了溶剂消耗与能耗,为川射干的高值化开发提供了切实可行的技术路径。

3.2 研究展望

但是,本研究目前聚焦于酶解工艺的初步优化,尚未延伸至下游纯化环节及中试规模的工艺验证。此外,可进一步引入物理场强化策略,探索超声辅助酶解或微波辐射耦合技术。在酶制剂利用方面,建议开展酶的固定化技术研究[23],采用磁性纳米载体、高分子凝胶等材料实现酶的回收与重复使用,从而显著降低酶制剂使用成本[24]。

最终,需推进至规模化试验阶段,并同步开展全流程的技术经济分析及生命周期评估,全面衡量该工艺的经济效益与环境可持续性,为绿色生物制造技术的工业落地提供数据支撑。

参考文献:

[1] 滕力庆,聂婧,丁雪莹,等.川射干的化学成分及药理作用研究进展[J].山东畜牧兽医,2024,45(10):101-104.

[2] 袁崇均,陈帅,罗森,等.川产道地药材川射干系统开发研究综述(Ⅱ)[J].四川中医,2022,40(1):217-220.

[3] 郭文慧.射干和川射干清热解毒药效物质基础比较研究[D].南昌:江西中医药大学,2024.

[4] 袁崇均,王笳,陈帅,等.川射干化学成分的研究[J].天然产物研究与开发,2008,20(3):444-446.

[5] 熊豪,高萌,杨元丰,等.射干和川射干清热解毒活性成分研究现状与思路[J].中国医院药学杂志,2023,43(5):576-583.

[6] 张志国,吕泰省,邱庆浩,等.川射干与射干中异黄酮类化学成分的含量比较[J].中国药师,2013,16(10):1452-1454.

[7] Tzanova M, Atanasov V, Yaneva Z, et al. Selectivity of current extraction techniques for flavonoids from plant materials[J]. Processes, 2020, 8(10): 1222.

[8] Abidin L, Mujeeb M, Mir S R, et al. Comparative assessment of extraction methods and quantitative estimation of luteolin in the leaves of Vitex negundo Linn. By HPLC[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2014, 7: S289-S293.

[9] Heal H H, Al-Dallee Z T, Khadim E J. Extraction, isolation and identification of luteolin flavonoid from Vitex pseudonegundo leaves[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1262(5): 052016.

[10] 郭跃山.酶法在中药有效成分提取中的应用[J].首都食品与医药,2019,26(14):195-196.

[11] 黄燕秋,李嘉俊,冯英苗,等.酶辅助提取技术在中药化学成分提取中的应用研究进展[J].林业科技通讯,2023(4):54-57.

[12] Gligor O, Mocan A, Moldovan C, et al. Enzyme-assisted extractions of polyphenols-A comprehensive review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 302-315.

[13] Lemoni Z, Kalantzi S, Lymperopoulou T, et al. Kinetic modeling and biological activities of Rosa canina L. Pseudo-fruit extracts obtained via enzyme-assisted extraction[J]. Antioxidants, 2025, 14(5): 558.

[14] 周洪旭,张毅,杨新勇,等.一测多评法测定川射干中 8 个异黄酮类成分的含量[J].药物分析杂志,2022,42(6):1072-1080.

[15] 卿钦,杨俊毅,尹宗宁.HPLC 同时测定射干提取物中的射干苷和鸢尾黄素[J].华西药学杂志,2011,26(6):595-597.

[16] Zhang Baocai, Gao Yihong, Zhang Lanjun, et al. The plant cell wall: Biosynthesis, construction, and functions[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(1): 251-272.

[17] Cao Qijiang, Zhang Wei, Liu Xinyan, et al. AtFTCD-L, a trans-Golgi network localized protein, modulates root growth of Arabidopsis in high-concentration agar culture medium[J]. Planta, 2022, 256: 3.

[18] Shimada T, Takagi J, Ichino T, et al. Plant vacuoles[J]. Annual Review of Plant Biology, 2018, 69: 123-145.

[19] Arcus V L, Mulholland A J. Temperature, dynamics, and enzyme-catalyzed reaction rates[J]. Annual Review of Biophysics, 2020, 49: 163-180.

[20] de Espindola A, Dutournié P, Ponche A. Impact of industrial stress factors on lysozyme enzyme: Role of denaturation processes and initial protein activity[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2023, 31: 100964.

[21] Scheerer D, Levy D, Casier R, et al. Interplay between conformational dynamics and substrate binding regulates enzymatic activity: A single-molecule FRET study[J]. Chemical Science, 2025, 16(7): 3066-3077.

[22] Mbira C. Influence of substrate concentration on enzyme activity in bio catalysis[J]. Journal of Chemistry, 2024, 3(1): 48-58.

[23] Lobel B T, Baiocco D, Al-Sharabi M, et al. Current challenges in microcapsule designs and microencapsulation processes: A review[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(31): 40326-40355.

[24] Zhang Feng, Lian Mengying, Alhadhrami A, et al. Laccase immobilized on functionalized cellulose nanofiber/alginate composite hydrogel for efficient bisphenol A degradation from polluted water[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(3): 1852-1864.

(责任编辑:王亚宾;校 对:孙洪清)