

· 技术方法 ·

火龙果果皮中可溶性膳食纤维的提取方法

张桂春, 刘玉静, 李延敏, 牟萍, 曲明娟, 李清, 周菊华*

鲁东大学生命科学学院/鲁东大学肿瘤免疫新技术研究中心, 烟台 264025

摘要 火龙果(*Hylocereus undulatus*)果皮可以作为一种优良的膳食纤维来源, 且其膳食纤维具有良好的理化性能。为提高火龙果果皮的综合利用水平, 该研究以火龙果果皮为原料, 首先采用纤维素酶水解法对火龙果果皮中的可溶性膳食纤维进行提取, 然后采用单因素试验和响应面法优化酶提取工艺。结果表明, 纤维素酶法提取火龙果果皮中可溶性膳食纤维的优化工艺条件为: 纤维素酶浓度0.54%, 酶解温度50°C, pH5.2。在此条件下, 可溶性膳食纤维的提取率可达19.81%; 膳食纤维的持水力为31.25 g·g⁻¹, 溶胀性为29.11 mL·g⁻¹。

关键词 火龙果果皮, 可溶性膳食纤维, 纤维素酶, 响应面法

张桂春, 刘玉静, 李延敏, 牟萍, 曲明娟, 李清, 周菊华 (2017). 火龙果果皮中可溶性膳食纤维的提取方法. 植物学报 52, 622–630.

火龙果(*Hylocereus undulatus*), 又称龙珠果、红龙果或仙蜜果, 是仙人掌科量天尺属植物的果实。火龙果是热带水果中少有的凉性水果, 而且与荔枝(*Litchi chinensis*)、芒果(*Mangifera indica*)和龙眼(*Dimocarpus longan*)等相比, 其耐储运的优势十分明显。加之产量高且产期分散, 适合庭院经济和观光农业。更重要的是, 它含有丰富的可溶性膳食纤维(soluble dietary fibers, SDF)和维生素, 还含有一般植物果实少有的花青素以及植物性白蛋白, 是一种低热量、高纤维且营养丰富的水果, 因此其种植面积正在迅速扩大。一个完整的火龙果中, 果皮所占比例较大, 并且火龙果果皮中也含有较多的SDF。目前人们在食用火龙果时, 往往将果皮当作废物丢弃掉, 这种做法既浪费了资源, 也易引起环境污染。

根据溶解度的不同, 膳食纤维分为可溶性膳食纤维和非可溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)。IDF包括由Ces A相关蛋白参与、纤维素合酶复合体催化合成的纤维素(Saxena and Brown, 2000; Haigler et al., 2001; 魏建华和宋艳茹, 2002; 宋东亮等, 2008), 以及木质素和半纤维素等, IDF既不能溶解于水, 又不能被肠道中的微生物分解; SDF包括葡甘露聚糖、阿拉伯木聚糖、果胶、树胶和瓜尔豆胶等,

常存在于植物细胞液和细胞间质中。SDF的理化性能在许多方面优于IDF, 如具有比IDF更强的生理活性, 可溶解于水, 又可吸水膨胀, 能在肠道中大量吸收水分, 使粪便保持柔软状态, 并且能被肠道中的微生物分解, 促进肠道中有益菌大量繁殖; 同时, SDF还具有降血压、血脂和血糖等功效(郑健仙, 2001; 姜竹茂等, 2001)。因此, 存在于植物中的SDF近年来日益受到人们的关注。

目前, 国内外学者对于火龙果果皮的研究主要集中在色素(杨昌鹏等, 2010; 梁彬霞等, 2011)和果胶(杨昌鹏等, 2007; 杨明等, 2012)的提取, 对火龙果果皮中SDF提取的研究报道很少。前人仅采用化学法(宋燕, 2013)从火龙果果皮中提取SDF, 但化学法提取SDF的效率较低, 在环保上也存在弊端。近年来, 纤维素酶技术广泛应用于植物有效成分的提取、植物卵细胞的分离以及合子与原胚的分离等(姜彬惠等, 2004; 菅明霞等, 2009; 伍成厚等, 2012)。前人曾采用纤维素酶法提取菠萝(*Ananas comosus*)皮(戴余军等, 2014)、枣(*Ziziphus jujuba*)渣(郭雪霞等, 2014)和桃(*Amygdalus persica*)渣(孙慧和刘凌, 2007)等的SDF, 但酶法提取火龙果果皮中SDF的研究还未见报道。因此, 本研究采用纤维素酶水解法从火龙果果皮

收稿日期: 2016-05-23; 接受日期: 2017-01-10

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项(No.tshw20120718)

* 通讯作者。E-mail: juhua.zhou@gmail.com

中提取SDF。纤维素酶可以水解火龙果果皮细胞壁中的纤维素,从而使细胞壁疏松破裂,促进SDF从细胞壁和细胞内溶出,以提高提取效率。本研究先采用纤维素酶把SDF从果皮中提取出来,然后通过称重计算SDF得率。本研究主要运用Box-Behnken试验设计原理(Zhong and Wang, 2010)和响应面法进行分析。响应面分析法是一种高效的工艺优化方法,具有周期短、实验次数少及回归方程精确度较高的优点,用此方法优化工艺条件后可极大提高SDF的提取率(李淑娟等, 2009)。我们进一步对其品质进行分析,判定火龙果果皮是否适合作为膳食纤维的来源,研究结果将为提高经济效益、避免资源浪费和环境污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂和仪器

1.1.1 材料

选用新鲜火龙果(*Hylocereus undulatus* Britt.), 取出果肉,留下果皮。用蒸馏水将果皮洗净之后切碎,置于80°C烘箱中干燥至恒重,粉碎后过40目筛备用。

1.1.2 主要试剂

纤维素酶(酶活 $\geq 15\ 000.0\ \text{U}\cdot\text{g}^{-1}$, 湖南鸿鹰祥生物工程股份有限公司)、0.1 mol·L⁻¹盐酸、0.1 mol·L⁻¹氢氧化钠溶液、乙酸乙酯及无水乙醇等试剂均为分析纯,实验用水为双蒸水。

1.1.3 主要仪器

实验仪器包括: DHG-9240A鼓风干燥箱(上海天呈实验仪器制造有限公司); HC-280T2高速多功能粉碎机(永康市绿可食品机械有限公司); SHB-IV双A循环水式多用真空泵(郑州予科仪器设备有限公司); YP6220电子天平(上海越平科学仪器有限公司); PB-10精密酸度计(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司); RE-52A旋转蒸发器(上海予捷仪器有限公司); DK-S24电热恒温水浴锅(上海精宏实验设备有限公司和太仓精宏仪器设备有限公司); TGL20M台式高速冷冻离心机(上

海卢湘仪离心机仪器有限公司)。

1.2 试验设计

1.2.1 单因素试验设计

考察酶解时间、酶解温度、纤维素酶浓度和pH值4个因素,在各自6个水平下的火龙果果皮SDF的提取率。具体参数见表1。

1.2.2 响应面法试验设计

在单因素试验基础上,采用Box-Behnken试验设计原理(Zhong and Wang, 2010),考察显著影响SDF提取率的3个因素。其结果采用Design Expert 7.0.0软件进行分析。

1.3 实验方法

1.3.1 SDF提取工艺流程

SDF提取步骤如下:取火龙果果皮清洗干净→沥干水→烘干→粉碎→称取1 g火龙果果皮粉(过40目筛),加入纤维素酶溶液→调节pH值→恒温水浴,重复提取→离心(2 653 ×g, 10分钟)→收集上清液→浓缩上清液→加入4倍体积5%的乙酸乙酯,于4°C下沉淀24小时→离心(2 653 ×g, 10分钟)收集沉淀,用无水乙醇洗涤2次→干燥→得火龙果果皮SDF。

1.3.2 SDF得率计算

SDF得率(%)=(SDF产物质量(g)/火龙果果皮粉质量(g))×100%

1.3.3 单因素试验

准确称取6份1.0 g火龙果果皮粉,分别加蒸馏水至19 mL,搅拌均匀后调节酸碱度,加入纤维素酶粉末,定容至20 mL,浸提。纤维素酶浓度、酶解温度、酶解时间和pH值各因素按表1的水平设计,在考察每种因素时,其它各因素的水平固定。按1.3.1节的方法提取SDF,并按1.3.2节的公式计算SDF提取率。实验结果用SPSS软件进行单因素方差分析,当有显著差异时($P<0.05$),用Tukey's检验进行多重比较。

1.3.4 响应面试验

根据Box-Behnken试验设计原理(李莉等, 2015),在

表1 火龙果果皮中可溶性膳食纤维提取单因素试验因素及水平
Table 1 Factors and levels of single-factor experiment in the extraction of soluble dietary fibers from pitaya peel

Level	Factor			
	Cellulase concentration (%)	Enzymolysis temperature (°C)	Enzymolysis time (min)	pH
1	0	30	45	4.0
2	0.1	40	60	4.4
3	0.3	50	75	4.8
4	0.5	60	90	5.2
5	0.7	70	105	5.6
6	0.9	80	120	6.0

单因素试验结果基础上, 选取pH (X_1)、酶解温度(X_2)、纤维素酶浓度(X_3) (每组3个平行) 3个因素进行响应面实验, 试验因素及水平见表2

1.3.5 SDF品质测定

1.3.5.1 持水力测定

准确称取0.100 0 g火龙果果皮SDF, 置于10 mL离心管中, 加5 mL双蒸水, 室温下浸泡24小时后, 在2 653 \times g下离心15分钟, 取出, 去上层溶液, 沥干水分, 称重, 计算持水力(water holding capacity, WHC) ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) (李来好等, 2000)。

持水力($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)=(样品湿重(g)-样品干重(g))/样品干重(g)

1.3.5.2 溶胀性测定

准确称取0.100 0 g火龙果果皮SDF样品, 置于带刻度的离心管中, 读取体积, 加5 mL蒸馏水, 放置24小时, 不断搅拌, 观察其自由膨胀体积, 计算溶胀性(swelling capacity, SWC) ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$) (李来好等, 2000)。

溶胀性($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)=(溶胀后膳食纤维体积(mL)-样品体积(mL))/样品干重(g)

2 结果与讨论

2.1 SDF提取的单因素试验

单因素试验结果见图1。如图1A所示, 当纤维素酶浓度为0-0.5%时, 随着质量分数的增大, 火龙果果皮中SDF的提取率呈上升趋势。当纤维素酶浓度达到0.5%时, SDF的提取率最高; 纤维素酶浓度为0.5%-0.9%时, 随着纤维素酶浓度的继续增加, SDF提取率

表2 火龙果果皮中可溶性膳食纤维提取Box-Behnken试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of Box-Behnken experimental design in the extraction of soluble dietary fibers from pitaya peel

Factor	Level		
	-1	0	1
X_1 (pH)	4.8	5.2	5.6
X_2 (Enzymolysis temperature (°C))	40	50	60
X_3 (Cellulase concentration (%))	0.3	0.5	0.7

呈下降趋势。这可能是由于纤维素酶水解火龙果果皮细胞壁的主要成分纤维素, 使细胞壁疏松破裂, 有利于SDF游离出来。但随着纤维素酶添加量的增大, 可能会导致原料中的一些成分变性, 阻碍SDF的析出; 或者酶解反应过于强烈, 导致SDF裂解, 产生无水乙醇不能沉淀的低分子量的单糖或多糖, 最终表现为SDF提取率降低。纤维素酶浓度对SDF提取率的影响显著($P<0.05$)。因此, 根据单因素试验结果, 火龙果果皮中SDF提取的最佳纤维素酶浓度为0.5%。

如图1B所示, 在酶解温度介于30°C-50°C之间时, 随着酶解温度的升高, SDF的提取率逐渐增加; 在50°C-80°C之间, SDF的提取率随着酶解温度的升高而降低; 50°C时SDF的提取率最高。这可能是由于在30°C-50°C范围内, 纤维素酶的活性随着温度的升高而增大, 导致细胞壁被破坏的程度增大, 从而使更多的SDF从细胞壁和细胞内游离出来; 但温度太高, 会使纤维素酶蛋白失活, 同时也可能会破坏SDF的结构, 使SDF提取率降低。酶解温度对SDF提取率的影响显著($P<0.05$)。由单因素试验结果可知, 火龙果果皮中SDF提取的温度以50°C为宜。

由图1C可知, 在45-105分钟之间, 随着酶解时间的延长, SDF的提取率逐渐升高; 酶解时间为105分钟时, SDF的提取率达到最大值; 在105-120分钟之间, 随着酶解时间的延长, SDF的提取率呈下降趋势。这可能是由于在45-105分钟之间, 随着酶解时间的延长, 纤维素酶对火龙果皮的酶促反应更加完全, 使更多的SDF溶出; 到105分钟时, SDF溶出量达到最大; 继续延长酶解时间, 导致SDF的降解, 从而导致SDF的提取率降低。酶解时间对SDF提取率的影响不显著($P>0.05$)。综合考虑提取时间和提取效率, 从单因素试验结果来看, 选择酶解时间60分钟为宜。

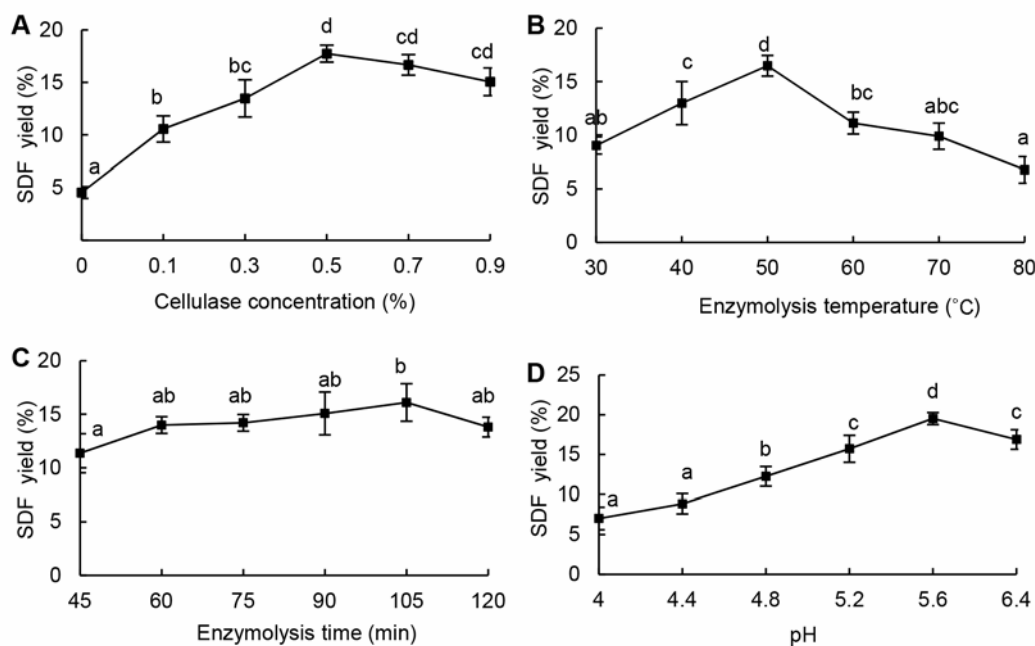


图1 纤维素酶浓度、酶解温度、酶解时间和pH值对火龙果果皮中可溶性膳食纤维提取率的影响

(A) 纤维素酶浓度; (B) 酶解温度; (C) 酶解时间; (D) pH值。SDF: 可溶性膳食纤维。不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Figure 1 Effects of cellulase concentration, enzymolysis temperature, enzymolysis time and pH on the yield of soluble dietary fibers from pitaya peel

(A) Cellulase concentration; (B) Enzymolysis temperature; (C) Enzymolysis time; (D) pH. SDF: Soluble dietary fibers. Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$.

由图1D可知, pH值对火龙果果皮中SDF的提取率有一定的影响。在pH值为4.0–5.6时, 随着pH值的增大, SDF的提取率逐渐升高; 在pH值为5.6时, 提取率达到最大; 此后随着pH值的增大, SDF的提取率降低。这可能是由于pH值的变化, 会导致纤维素酶蛋白的构象发生变化, 进而影响纤维素酶的活性。pH值过高或者过低, 都会影响纤维素酶对果皮细胞壁中纤维素的酶解作用, 最终导致SDF提取率的变化。pH值对SDF提取率的影响显著($P<0.05$)。根据单因素试验结果可知, 火龙果果皮中SDF提取的最适pH值为5.2。

2.2 响应面分析优化提取SDF

2.2.1 SDF提取工艺模型的建立及其显著性检验

在单因素试验结果的基础上, 以pH (X_1)、酶解温度 (X_2)、纤维素酶浓度 (X_3) 3个因素为自变量, 以火龙果果皮中SDF提取率为响应值, 利用Box-Behnken试验设计方案, 进行3因素3水平的响应面试验。试验设计及

结果见表3。

利用Design Expert 7.0.0软件对表3试验数据进行二次多项式回归拟合, 得到二次多元回归方程: $SDF(\%) = 19.91 + 0.47X_1 - 0.21X_2 + 0.16X_3 + 0.01X_1X_2 + 1.47X_1X_3 + 0.59X_2X_3 - 1.97X_1^2 - 1.44X_2^2 - 1.13X_3^2$ 。方程中各因素项系数的绝对值大小直接反映变量对响应值的影响程度, 故影响火龙果果皮SDF提取率的主要因素排序为pH (X_1) > 酶解温度 (X_2) > 纤维素酶浓度 (X_3)。

为了验证此模型的可行性, 对其进行方差分析和可信度分析, 结果见表4和表5。

从表4可以看出, 方差分析显示模型的 $P<0.0001$, 表明该模型极其显著。失拟项 $P=1.0000>0.05$, 表明方程对试验的拟合度较好, 此方法可靠。模型一次项pH (X_1)、酶解温度 (X_2) 和纤维素酶浓度 (X_3) ($P<0.01$) 对SDF提取率的影响均为极显著; 模型二次项 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 ($P<0.01$) 对SDF提取率的影响均为极

表3 火龙果果皮中可溶性膳食纤维提取Box-Behnken试验设计及结果**Table 3** Box-Behnken experimental design and results in the extraction of soluble dietary fibers from pitaya peel

Experiment No.	X_1	X_2	X_3	Extraction rate of SDF (%)
1	-1	-1	0	16.26
2	1	-1	0	17.17
3	-1	1	0	15.82
4	1	1	0	16.78
5	-1	0	-1	17.66
6	1	0	-1	15.65
7	-1	0	1	15.03
8	1	0	1	18.91
9	0	-1	-1	17.98
10	0	1	-1	16.39
11	0	-1	1	17.12
12	0	1	1	17.89
13	0	0	0	20.02
14	0	0	0	19.66
15	0	0	0	20.04
16	0	0	0	19.81
17	0	0	0	20.02

SDF: 可溶性膳食纤维; X_1 - X_3 分别代表pH、酶解温度和纤维素酶浓度。

SDF: Soluble dietary fibers; X_1 - X_3 indicate pH, enzymolysis temperature and cellulase concentration, respectively.

显著; 交互项 X_1X_3 和 X_2X_3 ($P<0.01$)对SDF提取率的影响极显著, X_1X_2 ($P>0.05$)对SDF提取率的影响不显著。因此, 试验设计中的3个因素对SDF提取率的影响并不是简单的线性关系。

可信度分析结果显示, 模型的调整系数 $R^2_{Adj}=0.9944$, 说明此模型拟合度良好, 试验误差较小。因此, 响应面法优化火龙果果皮中的SDF的提取条件可行。同时, 实验中变异系数为0.72%, 说明实验操作是可信的。综上所述, 该二次模型成立, 可用于预测纤维素酶酶解提取火龙果果皮SDF, 优化酶解工艺条件。

2.2.2 响应面结果及分析

纤维素酶水解法提取工艺中, 对pH (X_1)、酶解温度 (X_2)、纤维素酶浓度 (X_3) 3因素两两交互作用进行分析, 分别对其作响应面图和等高线图, 结果见图2。

从图2A-C可知, 3因素对火龙果果皮SDF提取率的影响大小排序为: pH>酶解温度>纤维素酶浓度, 且3因素对火龙果果皮SDF提取率影响的函数关系均为抛物线形, 说明随着酶解温度的升高, 以及pH值和纤

维素酶浓度的增大, SDF提取率均呈先增加后降低的趋势。因此, 在提取工艺中合适的水平可以使SDF的提取率达到最高值。

从图2D-F可知, pH (X_1)和酶解温度 (X_2)的交互作用不显著; pH (X_1)和纤维素酶浓度 (X_3)的交互作用显著; 酶解温度 (X_2)和纤维素酶浓度 (X_3)的交互作用显著。pH (X_1)、酶解温度 (X_2)和纤维素酶浓度 (X_3) 3因素两两作交互作用的排序为: pH和纤维素酶浓度>酶解温度和纤维素酶浓度>pH和酶解温度。

在选择3个因素中, 运用Design Expert 7.0.0软件分析回归模型, 得到火龙果果皮SDF的优化提取条件为pH5.25、酶解温度49.67°C、纤维素酶浓度0.54%。在此优化条件下, 火龙果果皮中SDF提取率的预测值为19.97%。

2.2.3 实验结果验证及分析

为了验证模型的可预测性以及实际操作的方便性和可行性, 将提取工艺修正为: pH5.2, 酶解温度50°C, 纤维素酶浓度0.54%。做3组平行实验对结果进行验证, 结果发现该条件下实际测得的火龙果果皮SDF提取率为19.81%, 与预测值19.97%相比, 相对误差为0.80%, 说明实际情况与模拟方程相符, 充分验证了模型的准确性。因此, 响应面法对火龙果果皮中SDF提取工艺的优化结果有效, 可以充分提高可溶性膳食纤维的提取率。

2.3 SDF持水力和溶胀性评价

持水力和溶胀性大小是衡量膳食纤维品质优劣的2个非常重要的指标。SDF的持水力和溶胀性越大, 其生理活性越好。在本实验最佳提取工艺条件下, 获得的火龙果果皮SDF的持水力为31.25 g·g⁻¹, 溶胀性为29.11 mL·g⁻¹, 说明用本方法提取的火龙果果皮SDF品质较好, 可作为一种优良的膳食纤维来源。

综上, 本研究通过4个单因素试验, 考察了纤维素酶浓度、酶解温度、酶解时间和pH值对火龙果果皮SDF提取率的影响。结果表明, 这4个因素对火龙果果皮SDF的提取率有不同程度的影响, 其中, 纤维素酶浓度、酶解温度和pH值对SDF提取率的影响显著, 酶解时间对SDF提取率的影响不显著。故选取纤维素酶浓度、酶解温度和pH值进行响应面试验, 结果表明, 在上述3因素中, pH值对火龙果果皮SDF提取率的影

表4 火龙果果皮中可溶性膳食纤维提取Box-Behnken试验方差分析**Table 4** Analysis of Box-Behnken experimental variances in the extraction of soluble dietary fibers from pitaya peel

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square error	F value	P value
Regression model	9	46.02	5.11	315.01	<0.0001
X_1	1	1.75	1.75	107.72	<0.0001
X_2	1	0.34	0.34	20.97	0.0025
X_3	1	0.20	0.20	12.42	0.0097
X_1X_2	1	6.250E-004	6.250E-004	0.039	0.8500
X_1X_3	1	8.67	8.67	534.31	<0.0001
X_2X_3	1	1.39	1.39	85.78	<0.0001
X_1^2	1	16.30	16.30	1004.13	<0.0001
X_2^2	1	8.67	8.67	534.15	<0.0001
X_3^2	1	5.38	5.38	331.22	<0.0001
Residual error	7	0.11	0.016		
Lack of fit	3	2.500E-005	8.333E-006	2.934E-004	1.0000
Pure error	4	0.11	0.028		
Total deviation	16	46.13			

$P < 0.05$ 表示影响显著; $P < 0.01$ 表示影响极显著; $P > 0.05$ 表示影响不显著。 X_1 – X_3 见表3。

$P < 0.05$ indicated significant impact; $P < 0.01$ indicated extremely significant impact; $P > 0.05$ indicated no significant effect. X_1 – X_3 see Table 3.

表5 火龙果果皮中可溶性膳食纤维提取Box-Behnken试验可信度分析**Table 5** Analysis of Box-Behnken experimental reliability in the extraction of soluble dietary fibers from pitaya peel

Standard deviation ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mean value ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Coefficient of variation (%)	PRESS	R^2	R^2_{Adj}	R^2_{Pred}	Signal noise ratio
0.13	17.78	0.72	0.18	0.9975	0.9944	0.9961	49.928

响最大, 其次是酶解温度, 第3是纤维素酶浓度。纤维素酶水解法提取火龙果果皮SDF的最佳提取工艺条件为: pH5.2, 酶解温度50°C, 纤维素酶浓度0.54%。在最佳工艺条件下, SDF的提取率可达到19.81%。纤维素酶水解法SDF提取率明显高于化学法(宋燕, 2013)。此法提取的火龙果果皮中SDF的持水力为 $31.25 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 溶胀性为 $29.11 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 是一种优良的膳食纤维。采用响应面分析方法对火龙果皮SDF提取工艺进行优化, 可获得最优的工艺参数, 能大大减少工艺操作的盲目性, 从而为火龙果果皮作为水溶性膳食纤维来源研究奠定基础。

2.4 讨论

采用响应面分析法对火龙果果皮SDF提取工艺进行优化, 可获得优化的工艺参数, 能大大减少工艺操作的盲目性。由于响应面法是数学和统计学方法的结合, 在优化响应值过程中, 可以连续地对试验因素的各个水平进行分析, 从而计算出最优水平, 克服了正交法

只能对单个孤立的试验点进行分析以及不能给出直观图形的缺陷(张弛, 2003)。

化学法提取SDF在环保上存在极大的弊端, 所用试剂大多会造成环境污染, 也会对仪器造成损耗。因此, 本研究采用纤维素酶水解法从火龙果果皮中提取SDF, 纤维素酶处理利于SDF从细胞壁和细胞内游离出来, 从而提高提取率。SDF是膳食纤维的一种, 它们的结构及组成不同于IDF (郑健仙, 2001; 姜竹茂等, 2001; Chambi and Grosso, 2006; Falguera et al., 2011)。SDF结构中不存在纤维素酶作用的化学键, 不能被纤维素酶水解, 因此, 在SDF的提取过程中加入适量纤维素酶会疏松细胞壁但不分解所提取的SDF。宋燕(2013)使用化学法提取火龙果果皮SDF的提取率为14.07%。本研究采用纤维素酶水解法得出的SDF提取率(19.81%)明显高于化学法。

纤维素酶是降解纤维素生成葡萄糖的一组酶的总称, 它不是单体酶, 而是一组起协同作用的多酶复合物, 主要由内切 β -葡聚糖酶、外切 β -葡聚糖酶和 β -

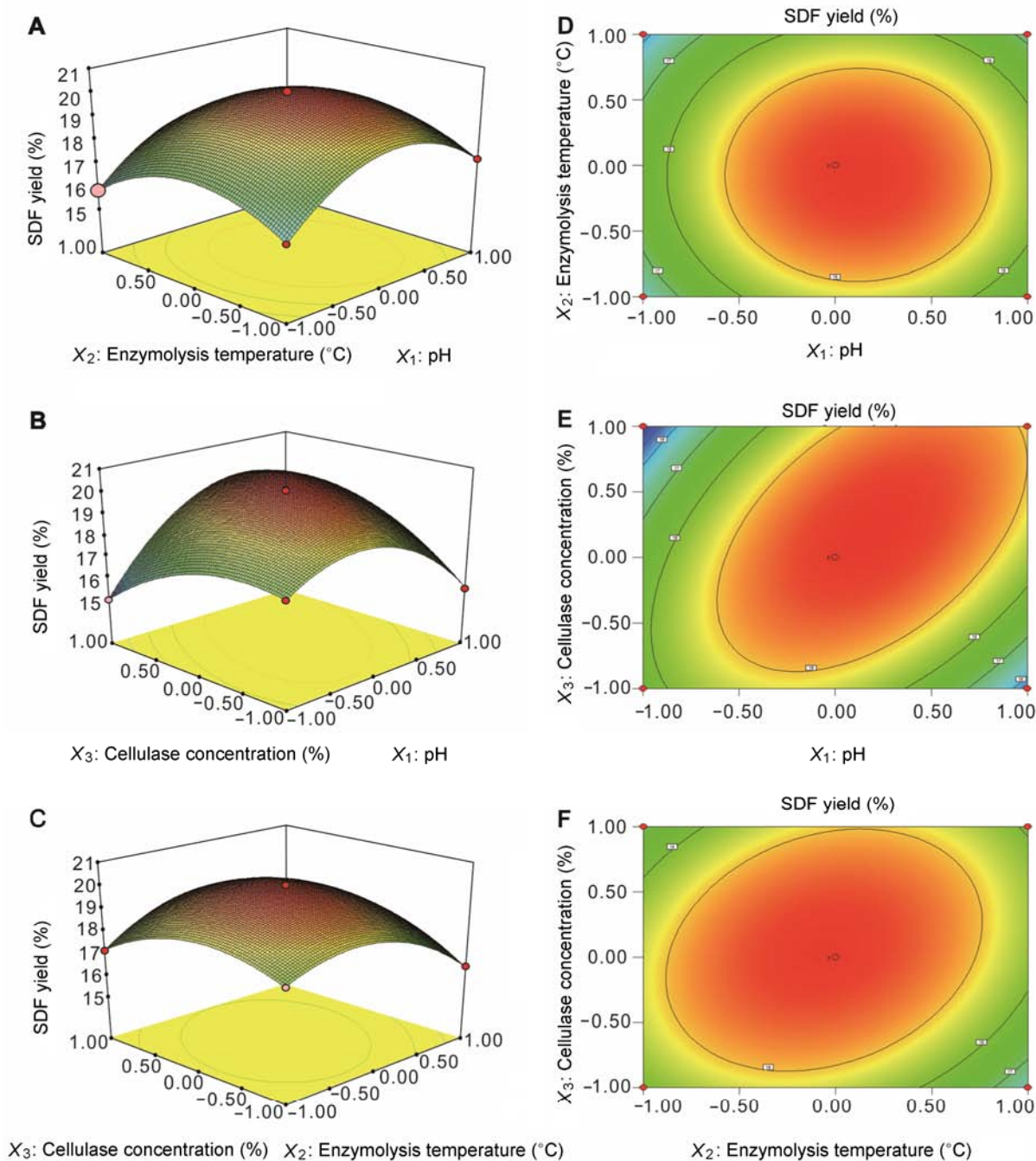


图2 火龙果果皮中可溶性膳食纤维(SDF)提取pH (X_1)、酶解温度(X_2)和纤维素酶浓度(X_3)两两交互作用的响应面图((A)–(C))和等高线图((D)–(F))

Figure 2 Response surface plot ((A)–(C)) and its contour plot ((D)–(F)) of pairwise interactions among pH (X_1), enzymolysis temperature (X_2) and cellulase concentration (X_3) in the extraction of soluble dietary fibers (SDF) from pitaya peel

葡萄糖苷酶等组成,此外,还具有很高的木聚糖酶活性。由于纤维素酶难以提纯,实际应用的酶制剂一般还含有少量的淀粉酶、蛋白酶和果胶酶等。若酶制剂

添加量过多,其中含有的上述酶达到一定量后,会作用于淀粉、蛋白质甚至是SDF,导致SDF提取率下降。因此,纤维素酶的添加量要适宜,本研究中优化后的

纤维素酶浓度为0.54%。

为了能让纤维素酶更好地发挥作用, 纤维素酶的作用条件(如温度和pH值)都有严格要求, 过酸、过碱和高温都会使纤维素酶失活。此外, 不同纤维素酶的最适作用条件也不同, 酸性纤维素酶的最适pH值为3.5–4.0, 最适温度为45°C–55°C; 中性纤维素酶的最适pH值为4.5–6.0, 最适温度为45°C–55°C; 碱性纤维素酶的最适pH值为10–11, 最适温度为45°C–55°C (Saxena et al., 2016)。本研究中使用的是中性纤维素酶, 优化后的工艺条件为温度50°C, pH5.2。持水力和溶胀性等理化性能是衡量SDF品质优劣的重要指标(Renaud et al., 2005)。研究结果表明, 本方法所获得的SDF具有较高的品质。因此, 火龙果果皮是SDF的良好来源, 纤维素酶法是一种安全高效提取火龙果果皮中SDF的方法。

参考文献

- 戴余军, 石会军, 李长春, 张俊, 王文丰, 成传普 (2014). 菠萝皮可溶性膳食纤维酶法提取工艺的研究. *食品工业* **35**(2), 58–61.
- 郭雪霞, 牟建楼, 王颀, 郭海枫 (2014). 纤维素酶法提取枣渣可溶性膳食纤维的工艺研究. *中国农业科技导报* **16**(5), 154–159.
- 菅明霞, 张亚楠, 王雅英, 田惠桥 (2009). 葱卵细胞的分离. *植物学报* **44**, 345–350.
- 姜彬慧, 胡筱敏, 左小红, 赵余庆 (2004). 酶技术与中药现代化. *世界科学技术: 中医药现代化* **6**(2), 46–49.
- 姜竹茂, 陈新美, 缪静 (2001). 从豆渣中制取可溶性膳食纤维的研究. *中国粮油学报* **16**(3), 53–55.
- 李来好, 杨贤庆, 陈培基, 吴燕燕, 刁石强, 徐泽智 (2000). 麒麟菜高活性膳食纤维的提取与功能性试验. *湛江海洋大学学报* **20**(2), 28–33.
- 李莉, 张赛, 何强, 胡学斌 (2015). 响应面法在试验设计与优化中的应用. *实验室研究与探索* **34**(8), 41–45.
- 李淑娟, 詹亚光, 杨传平, 徐云刚 (2009). 基于响应面法的白蜡属花粉离体萌发培养基优化. *植物学报* **44**, 223–229.
- 梁彬霞, 赵文红, 白卫东, 钱敏, 李夏雷 (2011). 火龙果果皮色素提取工艺研究. *中国食品添加剂* (6), 103–108.
- 宋东亮, 沈君辉, 李来庚 (2008). 高等植物细胞壁中纤维素的合成. *植物生理学通讯* **44**, 791–796.
- 宋燕 (2013). 火龙果果皮中可溶性膳食纤维的提取. *食品与发酵工业* **39**, 209–212.
- 孙慧, 刘凌 (2007). 优化纤维素酶水解桃渣制备可溶性膳食纤维工艺条件的研究. *食品与发酵工业* **33**(11), 60–64.
- 魏建华, 宋艳茹 (2002). 植物纤维素酶基因研究进展. *植物学通报* **19**, 641–649.
- 伍成厚, 李冬妹, 田惠桥 (2012). 五唇兰合子与原胚的分离. *植物学报* **47**, 286–291.
- 杨昌鹏, 陈智理, 王秀芳, 李晓明 (2007). 火龙果果皮中提取果胶的工艺研究. *保鲜与加工* **7**(6), 46–48.
- 杨昌鹏, 唐志远, 卢艺, 黄海波 (2010). 火龙果果皮红色素的提取分离研究. *安徽农业科学* **38**, 347–349, 496.
- 杨明, 胡文娥, 吴寿中 (2012). 微波辅助提取火龙果果皮中果胶工艺. *食品研究与开发* **33**(2), 55–58.
- 张弛 (2003). 六西格玛试验设计. 广州: 广东经济出版社. pp. 289–307.
- 郑健仙 (2001). 低能量食品. 北京: 中国轻工业出版社. pp. 12–18.
- Chambi H, Grosso C (2006). Edible films produced with gelatin and casein cross-linked with transglutaminase. *Food Res Int* **39**, 458–466.
- Falguera V, Quintero JP, Jimenez A, Muñoz JA, Ibarz A (2011). Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. *Trends Food Sci Technol* **22**, 292–303.
- Haigler CH, Ivanova-Datcheva M, Hogan PS, Salnikov VV, Hwang S, Martin K, Delmer DP (2001). Carbon partitioning to cellulase synthesis. *Plant Mol Biol* **47**, 29–51.
- Renaud M, Belgacem MN, Rinaudo M (2005). Rheological behaviour of polysaccharide aqueous solution. *Polymer* **46**, 12348–12358.
- Saini JK, Patel AK, Adsul M, Singhanian RR (2016). Cellulase adsorption on lignin: a roadblock for economic hydrolysis of biomass. *Renew Energy* **98**, 29–42.
- Saxena IM, Brown RM Jr (2000). Cellulase synthases and related enzymes. *Curr Opin Plant Biol* **3**, 523–531.
- Zhong K, Wang Q (2010). Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from dried longan pulp using response surface methodology. *Carbohydr Polym* **80**, 19–25.

Extraction of Soluble Dietary Fibers from Pitaya Peel

Guichun Zhang, Yujing Liu, Yanmin Li, Ping Mu, Mingjuan Qu, Qing Li, Juhua Zhou^{*}

School of Life Sciences, Ludong University/Research Center of New Technology for Tumor Immunology, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract Pitaya peel can be a good source for preparing dietary fibers, and such dietary fibers has excellent physico-chemical properties. To stimulate the comprehensive utilization of pitaya, we optimized the extraction of soluble dietary fibers (SDF) from pitaya peel. The cellulase digestion method was used with single-factor experiments and the response surface method. The optimized extraction conditions were cellulase concentration of 0.54%, enzymolysis temperature at 50°C and solvent pH of 5.2. Under the optimal conditions, the extraction rate of SDF from pitaya peel was up to 19.81%, the water holding capacity was 31.25 g·g⁻¹ and the swelling capacity was 29.11 mL·g⁻¹.

Key words Pitaya peel, soluble dietary fibers, cellulase, response surface method

Zhang GC, Liu YJ, Li YM, Mu P, Qu MJ, Li Q, Zhou JH (2017). Extraction of soluble dietary fibers from pitaya peel. *Chin Bull Bot* **52**, 622–630.

* Author for correspondence. E-mail: juhua.zhou@gmail.com

(责任编辑: 朱亚娜)