

郑坚强, 叶豪, 司俊玲, 等. 响应面优化萃取宁夏枸杞类胡萝卜素工艺研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 197–201.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.047

响应面优化萃取宁夏枸杞类胡萝卜素工艺研究

郑坚强, 叶豪, 司俊玲, 宋佳旭, 李红, 吴晓宗, 彭新榜
(郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 河南郑州 450002)

摘要:以宁夏枸杞为原材料, 采用有机溶剂为萃取剂, 在正交试验的基础上, 通过响应面试验优化类胡萝卜素萃取工艺中的料液比、萃取时间、萃取温度以及有机溶剂混合的比例。采用 DPPH(1,1-二苯基-2-苦肟基)自由基清除剂测量宁夏枸杞中类胡萝卜素的抗氧化活性。结果表明, 无水乙醇和石油醚体积比为 2:1, 料液比为 1 g:10 mL, 温度为 40 ℃, 萃取时间为 50 min 时, 萃取效果最好。萃取的类胡萝卜素自由基清除率为 90.57%, 说明宁夏枸杞中的类胡萝卜素具有较高的抗氧化活性。

关键词:枸杞; 类胡萝卜素; 响应面优化; 抗氧化活性

中图分类号: R284.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)07-0197-05

类胡萝卜素(carotenoids)是一种多烯类物质, 一般由 8 个类异戊二烯单位组成, 有抗氧化作用^[1-2], 同时还有抗癌、预防夜盲症等功效^[3-4]; 其着色能力强, 是安全、可靠、颜色自然的天然色素, 越来越受到人们的喜爱。迄今为止人们已经发现了 600 多种类胡萝卜素, 促进了食品工业的发展^[5]。类胡萝卜素对光、热、氧等条件比较敏感, 稳定性较差, 因此对于类胡萝卜素的萃取技术研究, 一直在不断发展和改进^[6-8]。

类胡萝卜素是脂溶性物质, 可选择不同的有机溶剂萃取(例如用石油醚萃取 β -胡萝卜素)^[9], 或者用多种有机溶剂同时萃取, Melendez-Martinez 等用比例为 1:1:2 的甲醇:丙酮:正丁烷混合液萃取橘汁中的类胡萝卜素^[10]。但要分析有机物都相溶性, 如甲醇和石油醚密度相差过大, 会分层而不相溶^[11]。有机溶剂萃取方法简便、经济节约, 在工业生产上被广泛应用。

本试验通过控制有机溶剂含量、萃取时间、温度以及料液比等变量, 比较不同条件下萃取效果, 并用 DPPH 自由基清除剂测量类胡萝卜素的抗氧化活性, 以期从我国优势植物资源中萃取类胡萝卜素积累研究经验, 为进一步开发枸杞深加工产品提供研究思路。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂和仪器

1.1.1 材料 枸杞(产地:宁夏荣平), 食品级, 低温贮藏。

1.1.2 试剂 无水乙醇、甲醇、石油醚、乙酸乙酯(分析纯, 天津市凯通化学试剂有限公司); 1-1-二苯基-2-苦肟基(DPPH)[分析纯, 梯希爱(上海)化成工业发展有限公司]。

收稿日期:2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:31571778); 河南省科技攻关(农业领域)计划(编号:172102110137)。

作者简介:郑坚强(1976—), 男, 山西翼城人, 博士, 副教授, 主要从事食品生物技术研究。Tel:(0371)86609650; E-mail:jzqzheng76@126.com。

通信作者:司俊玲, 硕士, 副教授, 主要从事食品加工技术研究。Tel:(0371)86609650; E-mail:jlsj76@126.com。

1.1.3 仪器与设备 高速多功能粉碎机(上海冰都电器有限公司); 旋转蒸发仪(成都胜拓仪器有限公司); 真空泵(杭州海驰科技有限公司); 紫外分光光度计(上海美普达仪器有限公司); 真空冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司); 低温冷却循环泵(郑州凯鹏实验仪器有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 枸杞冷冻干燥 枸杞的颗粒较大, 采用真空冷冻方法去除水分(真空度为 -0.2 MPa, 冷冻干燥时间为 12 h, 温度为 -40 ℃), 然后粉碎成粉末。将制得的枸杞粉末在密闭、低温、避光条件下贮藏。

1.2.2 类胡萝卜素的萃取方法 经查阅资料和预试验, 甲醇-无水乙醇正交试验、乙醇-石油醚正交试验和乙醇-乙酸乙酯正交试验因素设计见表 1 至表 3。

1.2.2.1 甲醇-无水乙醇正交试验 甲醇-无水乙醇正交试验, 选取 $L_9(3^4)$ 设计正交试验(表 1)。

表 1 甲醇-无水乙醇正交试验因素水平

水平	A: 温度 (℃)	B: 萃取时间 (min)	C: 料液比 (g/mL)	D: 甲醇: 无水乙醇
1	40	60	1:10	1:1
2	50	80	1:15	1:2
3	60	100	1:20	1:3

精确称取宁夏荣平枸杞粉末 1.00 g(将实际值记录好), 放入试管中, 根据正交试验设计加入不同体积比甲醇-无水乙醇混合溶液, 充分振荡, 温度、时间按照正交设计实施。萃取结束后, 将试管从水浴锅中取出, 再次振荡; 将静置后的溶液用真空泵抽滤, 弃去枸杞粉末, 将澄清液定容到 50 mL 容量瓶中待测。定容后的溶液用紫外分光光度计测定类胡萝卜素的吸光度。类胡萝卜素在 450 nm 处有最大吸光度, 因此在该波长处测定吸光度, 根据公式(1)计算类胡萝卜素含量^[12]。

$$M = \frac{1\,000 \times D \times V \times n}{2\,480 \times m_1} \quad (1)$$

式中: M 为萃取的类胡萝卜素含量, mg/100 g; D 为在 450 nm 处测得的类胡萝卜素吸光度; n 是稀释定容后的倍数; V 是样品液定容体积; m_1 是实际称取的枸杞质量, g; 2 480 是 1 cm

表 2 无水乙醇-石油醚 L ₉ (3 ⁴) 正交试验水平				
水平	A:温度 (℃)	B:萃取时间 (min)	C:料液比 (g : mL)	D:无水乙醇 : 石油醚
1	40	40	1 : 10	1 : 1
2	45	50	1 : 15	1 : 2
3	50	60	1 : 20	2 : 1

表 3 无水乙醇-乙酸乙酯 L ₉ (3 ⁴) 正交试验水平				
水平	A:温度 (℃)	B:萃取时间 (min)	C:料液比 (g : mL)	D:无水乙醇 : 乙酸乙酯
1	40	40	1 : 10	1 : 1
2	50	50	1 : 15	1 : 2
3	60	60	1 : 20	2 : 1

光程长的比色杯中 1 g/L 枸杞样品萃取液的理论吸光度(按玉米黄素记)。

1.2.2.2 乙醇-石油醚正交试验 按照乙醇-石油醚的正交试验设计实施。用公式(1)计算萃取的类胡萝卜素含量。

1.2.2.3 乙醇-乙酸乙酯的正交试验 按照无水乙醇-乙酸乙酯的正交试验设计实施。用公式(1)计算萃取的类胡萝卜素含量。

1.2.2.4 响应面优化法试验 采用无水乙醇-石油醚试剂作响应面优化试验。试验按照乙醇-石油醚响应面设计(表 4)中的相应温度、萃取时间、料液比和无水乙醇-石油醚配比实施。用公式(1)计算萃取的类胡萝卜素含量。

表 4 无水乙醇-石油醚响应面设计因素水平				
水平	因素			
	X ₁ :温度 (℃)	X ₂ :萃取时间 (min)	X ₃ :料液比 (g : mL)	X ₄ :无水乙 醇 : 石油醚
-1	40	40	1 : 20	1 : 2
0	45	50	1 : 15	1 : 1
1	50	60	1 : 10	2 : 1

1.3 抗氧化活性的测定

1.3.1 DPPH 溶液的配制 精密称取 DPPH 粉末 3.94 mg, 加入具塞棕色锥形瓶中,加入 100.00 mL 无水乙醇,摇匀,获得浓度为 0.10 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液。试验避光进行。

1.3.2 DPPH 自由基清除率的测定 准备 4 个试管,分别标注 D_{样品}、D_{对照}、D_{空白}、空白,其中空白用于调零。吸取 DPPH 溶液 2.00 mL 分别加入 D_{样品}和 D_{对照}试管中,再吸取 2.00 mL 无水乙醇溶液分别加入 D_{空白}和空白试管中,吸取萃样品溶液 2.00 mL 分别加入 D_{样品}和 D_{空白}试管中,振荡后置于暗处反应 30 min 后,在 517 nm 处分别测定 D_{样品}、D_{空白}、D_{对照}的吸光度。然后根据公式(2)计算出萃取的类胡萝卜素的自由基清除率^[12],表示类胡萝卜素的抗氧化活性的效果。

自由基清除率=1- $\frac{D_{\text{样品}}-D_{\text{空白}}}{D_{\text{对照}}}$ ×100%。

(2)

2 结果与分析

2.1 正交试验结果

2.2.1 甲醇-无水乙醇正交试验结果 从表 5 可以看出,按照极差大小,各因素对萃取枸杞中类胡萝卜素的影响作用由大到小为 D>A>B>C,即甲醇:无水乙醇(体积比)>温度>

萃取时间>料液比。最佳萃取条件为 A₃B₁C₁D₃,即萃取温度为 60℃、萃取时间为 60 min、料液比为 1 g : 10 mL,甲醇:无水乙醇=1 : 3(体积比)。利用正交试验优化的条件萃取枸杞中类胡萝卜素,测得的类胡萝卜素含量为 69.58 mg/100 g。

表 5 甲醇-无水乙醇正交试验结果					
试验号	A	B	C	D	类胡萝卜素含量 (mg/100 g)
1	1	1	1	1	62.59
2	1	2	2	2	62.99
3	1	3	3	3	64.33
4	2	1	2	3	66.98
5	2	2	3	1	62.00
6	2	3	1	2	64.92
7	3	1	3	2	65.24
8	3	2	1	3	66.05
9	3	3	2	1	63.21
k ₁	63.30	64.94	64.52	62.60	
k ₂	64.63	63.68	64.39	64.38	
k ₃	64.84	64.15	63.86	65.79	
R	1.54	1.26	0.66	3.19	

表 6 为甲醇-无水乙醇正交试验方差分析结果,可以看出,各因素影响不显著。

表 6 甲醇-无水乙醇正交试验方差分析				
因素	离差平方和	自由度	F 比	F 临界值
温度	4.179	2	0.738	4.460
时间	2.420	2	0.428	4.460
料液比	0.738	2	0.130	4.460
甲醇:乙醇	15.300	2	2.704	4.460
误差	22.64	8		

2.1.2 无水乙醇-石油醚正交试验结果 从表 7 可以看出,按照极差大小,各因素对萃取枸杞中类胡萝卜素的影响作用由大到小为 C>A>B>D,即料液比>温度>萃取时间>无水乙醇:石油醚(体积比)。最佳萃取条件为 A₁B₂C₁D₂,即萃取温度为 40℃,萃取时间为 50 min,料液比为 1 g : 10 mL,无水乙醇:石油醚=1 : 2(体积比)。用试验得出的优化条件,测得的类胡萝卜素含量为 317.56 mg/100 g。从无水乙醇-石油醚正交试验方差分析结果(表 8)可以看出,各因素影响

表 7 无水乙醇-石油醚混合溶剂正交试验结果					
试验号	A	B	C	D	类胡萝卜素含量 (mg/100 g)
1	1	1	1	1	303.32
2	1	2	2	2	302.99
3	1	3	3	3	294.00
4	2	1	2	3	297.01
5	2	2	3	1	294.02
6	2	3	1	2	300.07
7	3	1	3	2	296.00
8	3	2	1	3	302.16
9	3	3	2	1	298.36
k ₁	301.19	299.11	301.85	299.24	
k ₂	298.02	300.39	299.78	299.68	
k ₃	298.84	298.56	296.43	299.13	
R	3.17	1.83	5.42	0.55	

表 8 无水乙醇-石油醚正交试验方差分析

因素	离差平方和	自由度	F 比	F 临界值
温度	16.195	2	0.968	4.460
时间	5.308	2	0.317	4.460
料液比	44.876	2	2.684	4.460
乙醇:石油醚	0.509	2	0.030	4.460
误差	66.89	8		

不显著。

2.1.3 无水乙醇-乙酸乙酯正交试验 无水乙醇与乙酸乙酯的正交试验结果见表 9。从表中可以看出,各因素对萃取枸杞中类胡萝卜素的影响作用从大到小排列为 C>D>A>B,即料液比>乙醇:乙酸乙酯(体积比)>温度>萃取时间。萃取效果最好的条件为 A₁B₃C₁D₂,即萃取温度为 40℃、萃取时间为 60 min、料液比 1 g:10 mL、无水乙醇:乙酸乙酯=1:2(体积比)。利用优化条件,测得的类胡萝卜素含量为 286.75 mg/100 g。

表 9 无水乙醇-乙酸乙酯正交试验结果

试验号	A	B	C	D	类胡萝卜素含量 (mg/100 g)
1	1	1	1	1	284.98
2	1	2	2	2	283.22
3	1	3	3	3	280.58
4	2	1	2	3	281.00
5	2	2	3	1	279.74
6	2	3	1	2	285.27
7	3	1	3	2	281.20
8	3	2	1	3	284.00
9	3	3	2	1	282.91
k ₁	282.93	282.40	284.75	282.54	
k ₂	282.00	282.32	282.38	283.23	
k ₃	282.70	282.92	280.51	281.86	
R	0.93	0.56	4.24	1.37	

表 10 为无水乙醇-乙酸乙酯正交试验方差分析结果,可以看出,各因素影响不显著。

表 10 无水乙醇-乙酸乙酯正交试验方差分析

因素	离差平方和	自由度	F 比	F 临界值
温度	1.405	2	0.176	4.460
时间	0.634	2	0.079	4.460
料液比	27.117	2	3.393	4.460
乙醇:乙酸乙酯	2.814	2	0.352	4.460
误差	31.97	8		

2.2 无水乙醇-石油醚有机萃取响应优化试验结果

根据 Design-Expert 8.02 软件中的中心组合试验(Box-Behnken)原理,选取温度(℃)、萃取时间(min)、料液比(g:mL)、乙醇:石油醚(体积比)为试验因素,以宁夏枸杞中类胡萝卜素萃取液所测得的类胡萝卜素含量为响应值,进行响应面试验设计。

得到萃取的类胡萝卜素含量对萃取温度(℃)、萃取时间(min)、料液比(g:mL)、无水乙醇:石油醚(体积比)的回归方程。

类胡萝卜素含量=318.75-6.82X₁+6.37X₂+5.47X₃-1.18X₄-8.25X₁X₂-17.29X₁X₃+10.73X₁X₄+12.77X₂X₃+

17.29X₂X₄+13.47X₃X₄-21.83X₁²-27.26X₂²-16.53X₃²-15.18X₄²。

表 11 为无水乙醇-石油醚萃取响应面分析的设计方案及结果。

表 11 无水乙醇-石油醚萃取响应面分析法的设计方案及结果

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	类胡萝卜素含量 (mg/100 g)
1	0	0	0	0	317.76
2	0	1	1	0	301.49
3	-1	0	-1	0	265.78
4	-1	0	1	0	316.85
5	0	1	0	-1	273.91
6	1	0	0	1	277.08
7	1	0	1	0	265.78
8	-1	-1	0	0	274.82
9	1	1	0	0	265.33
10	0	0	1	-1	273.92
11	0	0	0	0	311.88
12	1	0	0	-1	254.02
13	-1	0	0	-1	285.21
14	0	0	-1	1	290.54
15	-1	1	0	0	296.51
16	0	0	0	0	310.98
17	0	-1	0	1	249.50
18	0	0	0	0	328.61
19	0	-1	1	0	249.51
20	0	0	-1	-1	308.26
21	0	1	0	1	290.64
22	-1	0	0	1	265.33
23	0	1	-1	0	252.22
24	0	-1	-1	0	251.31
25	0	0	1	1	310.07
26	0	-1	0	-1	301.94
27	1	-1	0	0	276.62
28	1	0	-1	0	283.86
29	0	0	0	0	324.54

由表 12 可知,模拟交互项中 X₁X₃、X₂X₄ 影响显著(P<0.05),在模拟的平方项中 X₁²、X₂²、X₃²、X₄² 影响显著(P<0.05)。各因素对萃取枸杞中类胡萝卜素的影响从大到小顺序为温度>萃取时间>料液比>乙醇:石油醚(体积比)。模型中的调整确定系数 R_{Adj}=95.93%,说明该模型能解释 95.93% 响应值的变化。得出的优化条件为萃取温度 45℃,萃取时间 50 min,料液比 1 g:12.5 mL,无水乙醇:石油醚=1:1(体积比),在此条件下测得的类胡萝卜素含量为 327.57 mg/100 g。

从图 1 可以看出,在固定料液比和无水乙醇与石油醚比例时,萃取时间与温度的交互作用对萃取枸杞中类胡萝卜素效果的影响。当固定萃取时间不变时,随着温度的增加,萃取的类胡萝卜素含量先上升后下降,当温度为 47℃时萃取的类胡萝卜素含量最高。当温度固定不变时,随着萃取时间的增加,萃取的类胡萝卜素含量先增加,在趋于 60 min 时略有下降,在 55 min 时萃取的类胡萝卜素含量最高。

从图 2 可以看出,在固定萃取时间和无水乙醇与石油醚

表 12 无水乙醇-石油醚萃取方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	13 404.26	14	957.45	4.25	0.005 3	
X_1	557.79	1	557.79	2.48	0.137 8	
X_2	486.27	1	486.27	2.16	0.163 8	
X_3	359.09	1	359.09	1.60	0.227 2	
X_4	16.60	1	16.60	0.07	0.789 9	
X_1X_2	272.18	1	272.18	1.21	0.290 1	
X_1X_3	1 195.64	1	1 195.64	5.31	0.037 0	*
X_1X_4	460.94	1	460.94	2.05	0.174 4	
X_2X_3	652.18	1	652.18	2.90	0.110 8	
X_2X_4	1 195.65	1	1 195.65	5.31	0.037 0	*
X_3X_4	725.90	1	725.90	3.22	0.094 2	
X_1^2	3 091.52	1	3 091.52	13.73	0.002 4	**
X_2^2	4 818.48	1	4 818.48	21.40	0.000 4	***
X_3^2	1 772.92	1	1 772.92	7.88	0.014 0	*
X_4^2	1 494.03	1	1 494.03	6.64	0.022 0	*
残差	3 151.74	14	225.12			
失拟项	2 912.54	10	291.25	4.87	0.070 3	
纯误差	239.21	4	59.80			
总回归	16 556.00	28				

注：*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上显著。

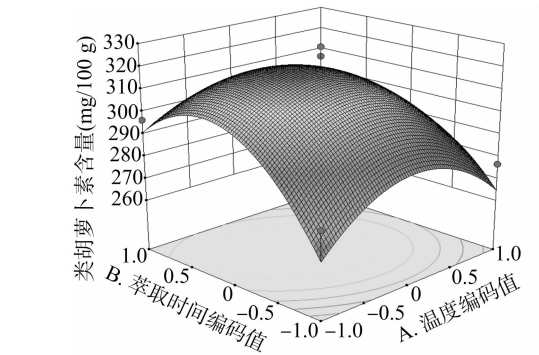


图1 时间与温度响应曲面

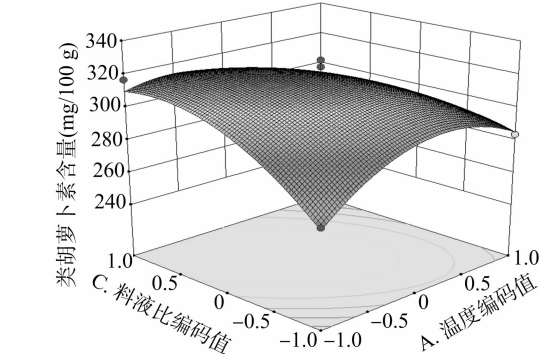


图2 料液比与温度响应曲面

比例时,料液比与温度的交互作用对萃取枸杞中类胡萝卜素效果的影响。当料液比固定不变时,随着温度的增加,萃取的类胡萝卜素含量先上升后下降,当温度在 45 ℃ 左右时萃取的类胡萝卜素含量最高。当温度固定不变时,随着料液比的增加,萃取的类胡萝卜素含量呈上升趋势。

从图 3 可以看出,在固定萃取时间和料液比时,无水乙醇与石油醚的比例和温度的交互作用对萃取枸杞中类胡萝卜素

效果的影响。当无水乙醇与石油醚比例固定不变时,随着温度的增加,萃取的类胡萝卜素含量先上升后下降,当温度在 45 ℃ 左右时萃取的类胡萝卜素含量最高。当温度固定不变时,随着无水乙醇:石油醚的比例增大,萃取的类胡萝卜素含量呈现先上升后下降的趋势。

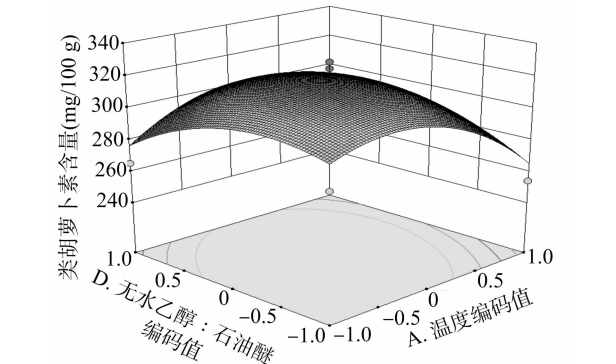


图3 无水乙醇与石油醚比例与温度响应曲面

从图 4 可以看出,在固定温度和无水乙醇:石油醚(体积比)时,萃取时间和料液比的交互作用对萃取类胡萝卜素含量的影响。当料液比固定不变时,随着萃取时间的增加,枸杞中类胡萝卜素含量先上升后下降。当萃取时间固定不变时,随着料液比的增加,萃取的类胡萝卜素含量呈现先上升后下降趋势。

从图 5 可以看出,在温度和料液比固定时,无水乙醇:石油醚(体积比)和萃取时间的交互作用对萃取枸杞中类胡萝卜素效果的影响。当无水乙醇:石油醚(体积比)固定不变时,随着萃取时间的增加,萃取的类胡萝卜素含量先上升后下降。当萃取时间固定不变时,随着无水乙醇:石油醚的比例增大,萃取的类胡萝卜素含量呈现先上升后下降趋势。

从图 6 可以看出,在温度和萃取时间固定时,无水乙醇与

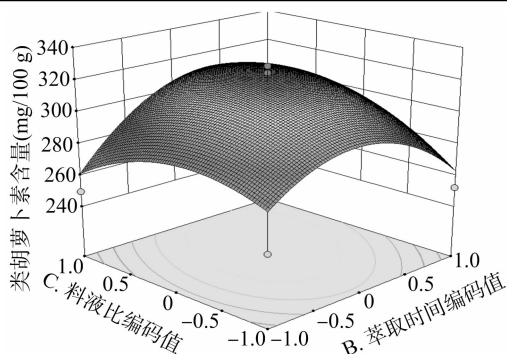


图4 时间与料液比响应曲面

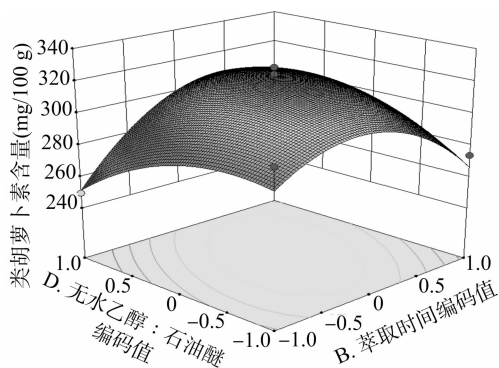


图5 无水乙醇和石油醚比例与时间响应曲面

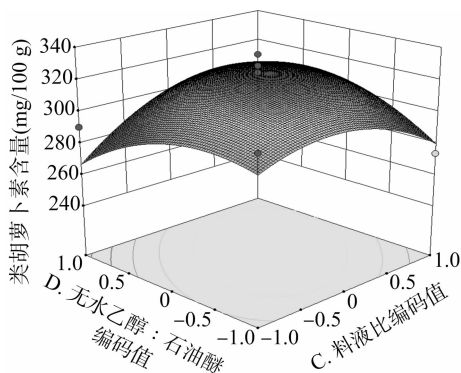


图6 料液比与无水乙醇和石油醚比例响应曲面

石油醚的比例和料液比的交互作用对萃取枸杞中类胡萝卜素效果的影响。当无水乙醇与石油醚比例固定不变时,随着料液比的增加,萃取的类胡萝卜素含量先上升后下降。当料液比固定不变时,随着无水乙醇:石油醚的比例增大,萃取的类胡萝卜素含量呈现先上升后下降的趋势。

2.3 自由基清除率的测定结果

采用响应面设计萃取的类胡萝卜素,自由基平均清除率为 90.57%,具有较好的抗氧化活性。

3 结论

本试验通过有机萃取法萃取宁夏枸杞中的类胡萝卜素。在单因素的基础上通过正交试验、响应优化试验可以找出最

优萃取类胡萝卜素的条件。

通过正交试验优化萃取工艺,结果表明,选用无水乙醇和石油醚作混合有机溶剂萃取效果较好。正交试验最佳条件为:温度 40℃,萃取时间 50 min,料液比 1 g:10 mL,无水乙醇:石油醚=1:2(体积比),萃取得到的类胡萝卜素含量为 317.56 mg/100 g。

在正交试验的基础上,进一步采用响应面设计优化最佳萃取工艺,对比发现,萃取类胡萝卜素最佳条件为:温度 45℃,萃取时间 50 min,料液比 1 g:12.5 mL,无水乙醇:石油醚=1:1(体积比),该条件下,枸杞中类胡萝卜素含量为 327.57 mg/100 g,比正交试验的萃取得率高 3.2%。通过抗氧化活性的测定,枸杞中类胡萝卜素自由基清除率为 90.57%,抗氧化活性较高。

参考文献:

- [1] Wu D T, Cheong K L, Deng Y, et al. Characterization and comparison of polysaccharides from *Lycium barbarum* in China using saccharide mapping based on PACE and HPTLC[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134: 12–19.
- [2] 周艳华,李涛,覃世民,等. 枸杞活性成分提取分离方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(24): 163–166.
- [3] Fang F, Peng T, Yang S M, et al. *Lycium barbarum* polysaccharide attenuates the cytotoxicity of mutant huntingtin and increases the activity of AKT[J]. International Journal of Developmental Neuroscience, 2016, 52: 66–74.
- [4] Zhao R, Jin R, Chen Y, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of *Lycium barbarum* polysaccharide in diabetic rats[J]. Chinese Herbal Medicines, 2015, 7(4): 310–315.
- [5] 徐佳佳,崔亚娟,姜菲菲,等. 几种常见的类胡萝卜素提取技术[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(19): 141–144.
- [6] 田明,徐晓云,范鑫,等. 柑橘中主要类胡萝卜素及其生物活性研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(5): 138–144.
- [7] Bae U J, Oh M R, Park J, et al. Supplementation with *Lycium chinense* fruit extract attenuates methionine choline-deficient diet-induced steatohepatitis in mice[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 31: 1–8.
- [8] Peng Q, Xu Q S, Yin H, et al. Characterization of an immunologically active pectin from the fruits of *Lycium ruthenicum*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64: 69–75.
- [9] 刘长付,陈媛梅. 超声波法提取西红柿中类胡萝卜素的工艺优化[J]. 食品工业, 2013, 34(8): 76–80.
- [10] Melendez-Martinez A J, Britton G, Vicario I M, et al. The complex carotenoid pattern of orange juices from concentrate[J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 546–553.
- [11] Dey S, Rathod V K. Ultrasound assisted extraction of β -carotene from *Spirulina platensis*[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1): 271–276.
- [12] 任丹丹,彭光华,王海滨,等. 蒺藜类胡萝卜素体外抗氧化活性的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(3): 228–231.