

# 太空茄子叶黄酮大孔树脂纯化工艺优化 及抗氧化性研究

## Purification of flavonoids from eggplant leaves using macroporous resin and its antioxidant activities

杨彬<sup>1</sup> 金小青<sup>2</sup> 李彩霞<sup>1</sup> 焦扬<sup>1</sup>

YANG Bin<sup>1</sup> JIN Xiao-qing<sup>2</sup> LI Cai-xia<sup>1</sup> JIAO yang<sup>1</sup>

(1. 河西学院农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000;

2. 甘肃省高校河西走廊特色资源利用省级重点实验室, 甘肃 张掖 734000)

(1. College of Agriculture and Biotechnology Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization of Gansu, Zhangye, Gansu 734000, China)

**摘要:**通过静态吸附与解吸附试验确定纯化太空茄子叶黄酮的大孔树脂类型并优化其工艺条件,对纯化前后太空茄子叶黄酮的抗氧化活性进行对比分析。结果表明,NKA-II为最佳树脂;NKA-II纯化太空茄子叶黄酮的适宜条件:粗黄酮上样浓度0.362 6 mg/mL、上样液pH 2、静态吸附2.5 h、用70%的乙醇(pH=3)解吸40 min,黄酮含量由纯化前17.91%上升到64.59%,纯化率提高3.61倍;与芦丁比较,纯化后黄酮对ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·的清除能力均小于芦丁,且纯化后黄酮对ABTS<sup>+</sup>·的清除能力高于纯化前。

**关键词:**茄子叶;大孔树脂;黄酮;纯化;抗氧化

**Abstract:** Static adsorption and desorption experiments were carried out to determine the types of macroporous resins for purifying flavonoids from eggplant leaves, to optimize its technological conditions, and to comparatively analyze the antioxidant activities of eggplant leaf flavonoids before and after purification. The results showed that NKA-II was the optimal adsorbent. The optimum conditions for purification of flavonoids from eggplant leaves were listed as follows: sample concentration of crude extracts 0.362 6 mg/mL, sample pH 2, the static absorption time, 2.5 h. After 40 minutes desorption with 70% ethanol (pH=3), the content of flavonoids was increased from 17.91% before purification to 64.59%, the rate of purification was improved by 3.61 times. Compared with rutin, scav-

enging activity of flavonoids after purification on ABTS<sup>+</sup>· and DPPH· was less, and scavenging activity of flavonoids after purification on ABTS<sup>+</sup>· was stronger than before purification.

**Keywords:** eggplant leaves; macroporous resin; flavonoids; purifying; antioxidant activities

茄子(*Fructus solanum melongena* L.)为茄科茄属以浆果为产品的一年生草本植物。原产地印度,在中国已有1 500多年的栽培历史<sup>[1]</sup>。太空茄作为其品种之一,产量高、品质好、营养丰富。茄叶作为茄子生产中的下脚料,资源丰富,目前主要被作为饲料或肥料使用,附加值较低。对茄子叶黄酮分离纯化的研究相对较少,仅见莫天录等<sup>[2]</sup>采用大孔吸附树脂对绿茄叶中黄酮的纯化研究,未见有关太空茄叶的研究报道。

黄酮类化合物是指以色原酮为母核的一大类有机化合物,是植物重要的次级代谢产物,广泛存在于植物的各个器官<sup>[3]</sup>。研究发现黄酮类化合物具有抗氧化、抗炎<sup>[4]</sup>、保肝、防止心血管疾病、抗过敏、抗突变<sup>[5]</sup>、皮肤抗衰老美容等多种生理功能<sup>[6]</sup>,因而黄酮被称为“第七类营养素”。目前众多学者从天然植物中提取黄酮等活性成分,然而茄子各部位含有许多活性成分<sup>[7]</sup>,其果实是重要的蔬菜。茄子果实采摘后,用茄子叶提取黄酮并进行分离纯化,补充活性成分资源不足,变废为宝。

大孔树脂是近年发展起来的一类具有多孔立体结构的有机高分子聚合物吸附剂,具有吸附容量大、选择性好、容易解吸、机械强度大、可重复使用等特点<sup>[8]</sup>,已广泛应用于多酚、生物碱、二氢槲皮素、皂苷等活性成分的分离纯化<sup>[9-10]</sup>。本试验拟通过对5种不同类型大孔树脂的吸附和解吸性能

**基金项目:**国家大学生创新创业训练计划项目(编号:201510740001);甘肃省科技支撑计划-农业类(编号:144NKCA241)

**作者简介:**杨彬,男,河西学院副教授,硕士。

**通信作者:**金小青(1975-),女,河西学院副教授,硕士。

E-mail:745713105@qq.com

**收稿日期:**2018-01-05

进行比较,筛选适宜的纯化太空茄叶黄酮的大孔树脂,对其静态吸附、解吸及动态纯化效果进行分析,并测定纯化前后黄酮提取物含量及抗氧化活性,以期为太空茄子叶黄酮深度开发和利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

太空茄子叶片:河西学院农学试验园采摘;

芦丁标准品:中国药品生物制品鉴定所;

无水乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

D101、D4020、X-5、AB-8、NAK-II 树脂:物理属性见表 1,天津南开大学化工厂;

双配套循环水式多用真空泵:SHZ-2000 型,河南省巩义市英峪予华仪器厂;

分光光度计:Spectr $\mu$ mlab24 型,上海棱光技术有限公司;

表 1 吸附树脂的物理性质

Table 1 Physical properties of the adsorption resin

| 树脂型号   | 极性  | 比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) | 平均孔径/nm | 粒径范围/mm    | 外观      |
|--------|-----|-----------------------------------------|---------|------------|---------|
| D101   | 非极性 | 600~640                                 | 85~90   | 0.315~1.25 | 乳白色球状颗粒 |
| D4020  | 非极性 | 540~580                                 | 100~105 | 0.315~1.25 | 乳白色球状颗粒 |
| X-5    | 非极性 | 500~600                                 | 290~300 | 0.300~1.25 | 乳白色球状颗粒 |
| AB-8   | 弱极性 | 480~520                                 | 130~140 | 0.300~1.25 | 乳白色球状颗粒 |
| NKA-II | 极性  | 160~200                                 | 145~155 | 0.300~1.25 | 棕色球状颗粒  |

数显恒温水浴锅:HH-4 型,国华电器有限公司;

电子天平:FA2104 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

层析柱:Φ15 mm×30 mm,上海亚荣生化仪器厂;

旋转蒸发器:RG-2000A 型,巩义市京华仪器有限责任公司;

恒温振荡培养箱:HZP-250 型,上海精宏实验设备有限公司;

自动核酸蛋白分离层析仪:MC99-2 型,上海青浦沪西仪器厂;

冷冻干燥机:Scientz-100F 型,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2 黄酮的提取与测定

1.2.1 太空茄叶预处理 太空茄子叶片清洗、阴干、粉碎、过 250  $\mu$ m 筛,按照 1:5 (g/mL) 比例加入石油醚回流 2.5 h,除去叶片中的色素、挥发油等物质后风干备用。

1.2.2 太空茄叶黄酮粗提取的制备 准确称取预处理的 50 g 太空茄子叶粉末,按照 1:42 (g/mL) 比例加入 78% 的乙醇,80  $^{\circ}$ C 回流提取 1.8 h,冷却后真空抽滤,收集上清液,减压浓缩回收乙醇,冷冻干燥后得太空茄叶黄酮浸膏;称取 2.5 g 黄酮浸膏,用去离子水溶解,移至 250 mL 容量瓶并定容,得到质量浓度 1.79 mg/mL 的黄酮溶液,冷藏备用。

1.2.3 太空茄子叶黄酮含量的测定 参照文献[11],根据式(1)计算黄酮含量。

$$Y = \frac{C \times V \times N}{M \times 10^6 \times V_s} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

Y——黄酮含量,%;

C——标准曲线上查得黄酮质量, $\mu$ g;

V——黄酮提取液总体积,mL;

N——样品的稀释倍数;

M——样品的重量,g;

$V_s$ ——测定时所取溶液的体积,mL。

1.3 最佳树脂筛选

1.3.1 树脂预处理 试验选用的 5 种树脂分别用无水乙醇浸泡 24 h 后过滤,采用去离子水冲洗至无乙醇味;吸干树脂表面水分后用 5% HCl 浸泡 3 h;去离子水冲洗至中性,用 2% NaOH 浸泡 3 h,去离子水洗至中性,吸干树脂水分后备用<sup>[12-13]</sup>。

1.3.2 树脂吸附率和解吸率测定 取 5 种预处理后大孔树脂各 2.0 g,置于 100 mL 三角瓶中,分别加入一定浓度的黄酮溶液 15 mL,在 25  $^{\circ}$ C、150 r/min 恒温振荡 24 h 后过滤,测定滤液中黄酮含量;在吸附饱和的树脂中加入 15 mL 体积分数为 78% 的乙醇溶液,振荡解吸 24 h 后过滤,测滤液中黄酮含量,按式(2)~(4)计算吸附率、解吸率及吸附量<sup>[14]</sup>。

$$\alpha = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%, \tag{2}$$

$$\beta = \frac{C_2}{C_0 - C_1} \times 100\%, \tag{3}$$

$$T = \frac{(C_0 - C_1) \times V_0}{M}, \tag{4}$$

式中:

$\alpha$ ——吸附率,%;

$\beta$ ——解吸率,%;

T——吸附量,mg/g;

$C_0$ ——初始样液黄酮质量浓度,mg/mL;

$V_0$ ——初始样液体积,mL;

$C_1$ ——吸附平衡后黄酮质量浓度,mg/mL;

$C_2$ ——解吸液中黄酮质量浓度,mg/mL;

M——预处理后树脂质量,g。

1.3.3 静态吸附 取 2.0 g 预处理树脂 NAK-II,放置在 50 mL 三角瓶中,以吸附时间、黄酮质量浓度、样液 pH 为单变量,加 15 mL 黄酮提取液,在 25  $^{\circ}$ C、150 r/min 的条件下振荡吸附饱和后,按前述方法测黄酮含量,计算吸附率。分别

以吸附率对时间、浓度、pH 作图并绘制静态吸附曲线。

1.3.4 静态解吸 取 2.0 g 预处理树脂 NAK-II,以解吸时间、解吸剂体积分数、解吸剂 pH 值为单变量,加 15 mL 乙醇解吸液,25 ℃、150 r/min 条件下振荡解吸,按前述方法测定解吸液黄酮含量,计算解吸率。分别以解吸时间、解吸剂体积分、解吸剂 pH 值作图并绘制静态解吸曲线。

1.3.5 太空茄子叶黄酮的 NKA-II 树脂柱层析 预处理的 NKA-II 树脂,湿法装柱(层析柱 15 mm×140 mm),用 5 倍柱床体积(BV)的蒸馏水除杂后,取质量浓度为 362.6 μg/mL 的粗黄酮,以 1.7 BV/h 的流速对黄酮上柱纯化。再用 12 BV 的蒸馏水除杂后以 8 BV、70%的乙醇解吸,每 3 min 收集 2.1 mL,每管取 0.3 mL 测定黄酮含量。

1.3.6 NKA-II 树脂对太空茄子叶黄酮的纯化效果 分别称取 0.1 g 粗黄酮和经纯化后的黄酮,用 78%的乙醇溶解后定容至 50 mL,各取 0.4 mL 测定黄酮含量,并计算纯化黄酮倍数。

1.3.7 纯化前后太空茄子叶黄酮抗氧化活性

(1) 对 DPPH·清除力:根据文[15~16]修改如下,吸取质量浓度为 33.6,16.8,13.4,6.7,4.5,3.4,2.7 μg/mL 的纯化前后黄酮液 2.00 mL,分别加入 0.15 mmol/L DPPH 溶液 2 mL,混合均匀后常温避光反应 30 min,在 517 nm 下测定吸光值  $A_i$ ,并以 2.00 mL 黄酮液和 2.00 mL 95%乙醇为样品空白组,以相同质量浓度的芦丁为阳性对照。按式(5)计算清除率。

$$CR = \frac{A_0 - (A_i - A_j)}{A_0} \times 100\%, \tag{5}$$

式中:

CR——清除率,%;

$A_0$ ——未加黄酮液样品的吸光度;

$A_j$ ——相应质量浓度黄酮液的本底吸光度;

$A_i$ ——样品组吸光值。

(2) 对 ABTS<sup>+</sup>·清除力:根据文献[17]。按式(5)计算 ABTS<sup>+</sup>·清除率。

1.4 数据统计与处理

采用 Excel 2003 进行数据处理,使用 SPSS 16.0 软件统计分析,不同树脂之间的显著性差异采用新 Duncan 复极法进行比较。试验重复 3 次。

2 结果分析

2.1 最佳树脂类型的筛选

如表 2 所示,D101 与 D4020 差异不显著,但 NAK-II 与其他树脂差异显著;从解吸率看,NAK-II 与 D4020 差异不显著,NAK-II 与其他树脂差异显著。X-5 的解吸率较高,但其吸附率最低;NAK-II 吸附率和解吸率均最高。综合吸附率、解吸率和吸附容量 3 个参数,得出 NAK-II 类型树脂是较好的吸附树脂,以下试验用 NAK-II 大孔树脂对太空茄子叶黄酮进行纯化。

2.2 静态吸附试验

2.2.1 吸附时间对 NAK-II 树脂吸附率的影响 从图 1 中

表 2 5 种树脂对太空茄子叶黄酮吸附率与解吸率的影响<sup>†</sup>

Table 2 Effects of 5 macroporous resins on absorption and desorption rates of flavonoids from eggplant leaves

| 树脂型号   | 总黄酮吸附容量/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 总黄酮<br>吸附率/%       | 总黄酮<br>解吸率/%        |
|--------|-----------------------------------|--------------------|---------------------|
| D101   | 11.20                             | 83.44 <sup>b</sup> | 68.23 <sup>dc</sup> |
| D4020  | 11.24                             | 83.75 <sup>b</sup> | 71.00 <sup>ab</sup> |
| X-5    | 9.79                              | 72.92 <sup>d</sup> | 70.88 <sup>ab</sup> |
| AB-8   | 10.60                             | 79.00 <sup>c</sup> | 64.24 <sup>d</sup>  |
| NAK-II | 12.97                             | 96.64 <sup>a</sup> | 71.29 <sup>a</sup>  |

<sup>†</sup> 同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

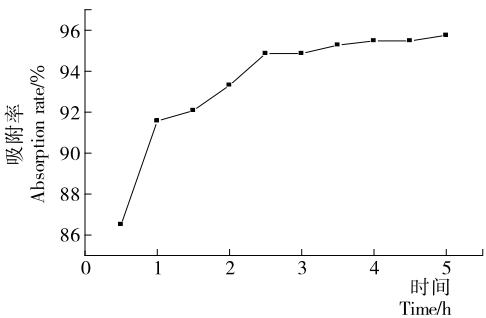


图 1 吸附时间对太空茄子叶黄酮吸附率的影响

Figure 1 Effects of absorption time on adsorption rates of flavonoids from eggplant leaves

可看出,吸附时间在 0.5~1.0 h 时吸附率增长迅速,1.0~2.5 h 时吸附速率较快,2.5 h 后达到平衡,之后随着时间继续延长,吸附率变化趋于平缓。因此,确定吸附时间为 2.5 h。

2.2.2 样品质量浓度对 NAK-II 树脂吸附的影响 由图 2 可知,太空茄子叶黄酮的吸附率随其质量浓度的升高呈先上升后下降趋势,当黄酮质量浓度为 0.362 6 mg/mL 时吸附率达最大值(98.257 4%);继续增大黄酮质量浓度,吸附率开始降低。可能是黄酮浓度越高,其结构中含有酚羟基、羰基官能团容易构成氢键而聚合成大分子,不易被吸附。因此,黄酮粗提液最佳质量浓度为 0.362 6 mg/mL。

2.2.3 黄酮粗提取液 pH 对 NAK-II 树脂吸附的影响 从图 3 可以看出,太空茄子叶黄酮的吸附率随其粗提液 pH 值

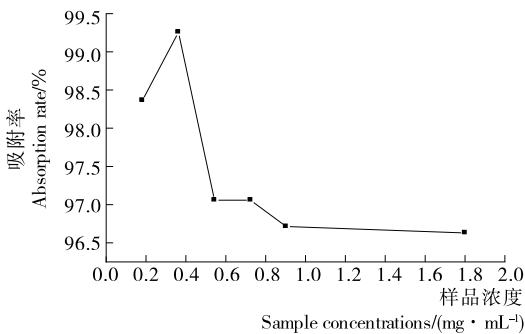


图 2 样品浓度对太空茄子叶黄酮吸附率的影响

Figure 2 Effects of sample concentrations on absorption rates of flavonoids from eggplant leaves

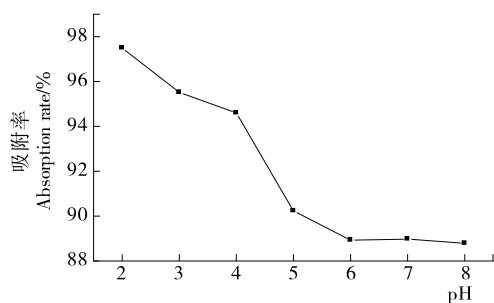


图3 样液 pH 对太空茄子叶黄酮吸附率的影响

Figure 3 Effects of sample pH on absorption rates of flavonoids from eggplant leaves

的升高呈下降趋势,当 pH 值为 2 时黄酮的吸附率最高(97.49%)。原因可能是 pH 值较小时,弱酸性黄酮类物质呈现为分子形式,通过范德华力相互作用被吸附;当 pH 值过高时,黄酮类分子中酚羟基  $H^+$  容易失去,形成离子结构,不易被树脂吸附。因此,适宜的黄酮粗提液 pH 值为 2。

### 2.3 静态解吸试验

2.3.1 太空茄子叶黄酮在 NAK-II 树脂上的解吸曲线 由图 4 可以看出,解吸时间在前 10 min 内,解吸率随时间的延长增长较快;10 min 后,解吸率增长较缓慢;当解吸时间到 40 min 时,解吸基本趋于平衡。因此,确定解吸时间为 40 min。

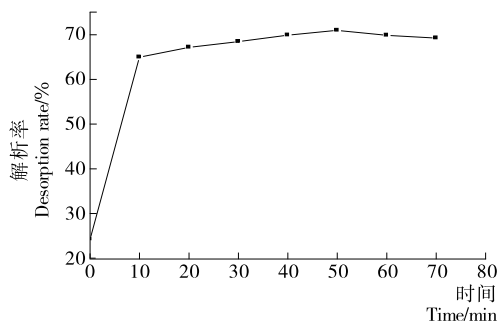


图4 解吸时间对太空茄子叶黄酮解吸率的影响

Figure 4 Effects of time on desorption rates of flavonoids from eggplant leaves

2.3.2 乙醇浓度对 NAK-II 树脂解吸效果的影响 黄酮类化合物大部分为极性且其范围较广泛。依据“相似相容”原理,不同极性的黄酮类化合物能溶于不同体积分数的乙醇。从图 5 可以看出,随乙醇体积分数的升高,解吸率先上升后下降;乙醇体积分数为 70% 时,解吸率达到最大值(72.79%)。因此,宜选用 70% 的乙醇作洗脱剂。

2.3.3 解吸 pH 对 NAK-II 树脂解吸效果的影响 从图 6 可以看出,随着乙醇 pH 值增大,黄酮解吸率呈下降趋势。乙醇为极性溶剂,可使大孔树脂溶胀,降低了树脂的吸附力,但酸的电离作用可提高乙醇溶液的极性,从而增强大孔树脂的解吸率。试验宜选用 pH 为 3 的乙醇为洗脱液。

### 2.4 太空茄子叶黄酮的动态洗脱曲线

太空茄子叶黄酮的动态洗脱曲线见图 7。当用去 42 mL (第 20 管)洗脱液时,达到洗脱最高峰;当洗脱液用去 8 BV

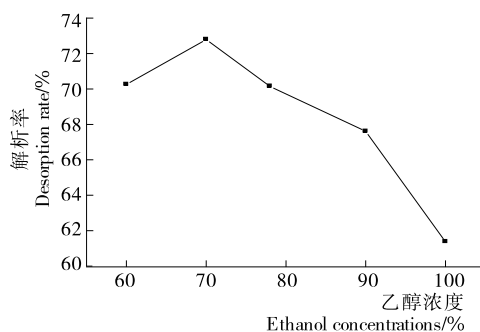


图5 乙醇浓度对太空茄子叶黄酮解吸率的影响

Figure 5 Effects of ethanol concentrations on desorption rates of flavonoids from eggplant leaves

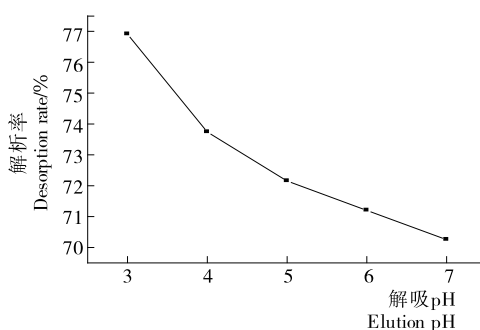


图6 解吸 pH 对太空茄子叶黄酮解吸率的影响

Figure 6 Effects of pH on desorption rates of flavonoids from eggplant leaves

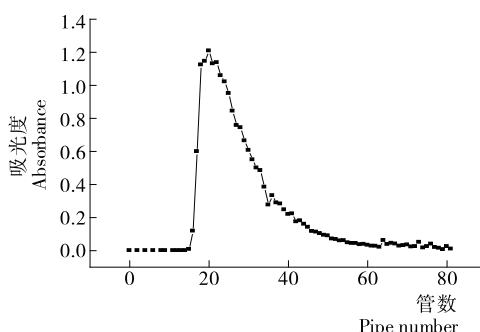


图7 太空茄子叶黄酮的动态洗脱曲线

Figure 7 Dynamic elution curve of flavonoids from eggplant leaves

(即 200 mL 时),洗脱液几乎呈无色,说明太空茄子叶黄酮已基本解吸完全。表明采用体积分数 70%、pH 值为 3.0 的乙醇溶液可以较好地解吸 NKA-II 树脂吸附的太空茄子叶黄酮,同时也表明 NKA-II 树脂对太空茄子叶黄酮的静态试验结果是可行的。

### 2.5 NKA-II 树脂对太空茄子叶黄酮的纯化效果

纯化后的太空茄子叶黄酮液经浓缩干燥后为黄色粉末,测定其干物质中黄酮含量为 64.59%,而粗品中黄酮含量为 17.91%,由此可见,纯化后干物质中黄酮质量分数明显提高,是粗提物的 3.61 倍。

### 2.6 对 DPPH 自由基的清除能力

DPPH· 是一种稳定的氮中心自由基,可捕获(清除)其它自由基,其醇溶液呈现深紫色,中和后会变无色或浅黄色,

在 517 nm 处有一强吸收峰。DPPH· 存在单电子,加入样品后,抗氧化物质释放的电子与 DPPH· 配对,使其吸收能力下降,颜色由深变浅。颜色的变化与其接受电子数呈定量关系,因此可以通过褪色程度来衡量清除活性的大小。太空茄子叶黄酮对 DPPH· 清除力见图 8 和表 3。

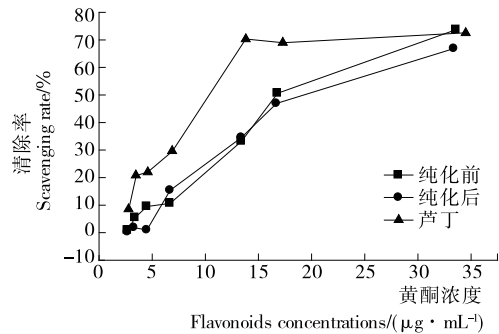


图 8 太空茄子叶黄酮对 DPPH· 的清除率  
Figure 8 Scavenging effects of flavonoids from eggplant leaves on DPPH·

表 3 清除 DPPH· 的 IC<sub>50</sub> 值<sup>†</sup>  
Table 3 The IC<sub>50</sub> values for scavenging DPPH·

| 样品    | 对数回归方程               | R <sup>2</sup> | IC <sub>50</sub> 值/<br>(μg·mL <sup>-1</sup> ) |
|-------|----------------------|----------------|-----------------------------------------------|
| 芦丁    | y=28.537ln(x)-18.346 | 0.911 3        | 10.97                                         |
| 纯化前黄酮 | y=28.648ln(x)-33.285 | 0.940 1        | 18.31                                         |
| 纯化后黄酮 | y=27.782ln(x)-33.768 | 0.966 1        | 20.39                                         |

<sup>†</sup> y 为 DPPH· 清除率,%;ln(x)为纯化前后对应黄酮或芦丁质量浓度的对数。

由图 8 可知,在试验范围内,随着各样品质量浓度的增大,DPPH· 清除率均呈递增趋势。由表 3 可知,IC<sub>50</sub> 值可确定清除 DPPH· 能力大小依次为芦丁>纯化前>纯化后,说明纯化前太空茄子叶黄酮所含的清除 DPPH· 的成分较纯化后多。

2.7 对 ABTS<sup>+</sup>· 的清除能力

ABTS<sup>+</sup>· 是一种 ABTS 经氧化生成稳定的蓝绿色水溶性自由基。ABTS<sup>+</sup>· 清除法目前已广泛用于生物总抗氧化力测定中。当加入样品后,若含有抗氧化物质提供氢体,使其溶液颜色变浅,导致在 734 nm 处的特征吸光度降低。溶液褪色变化与抗氧化剂浓度呈正比,因此依据溶液褪色变化,可以判断提取物或检测物的抗氧化能力,太空茄子对 ABTS<sup>+</sup>· 的清除能力见图 9 和表 4。

从图 9 可以看出,本试验范围内,ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除率是随样品质量浓度的升高呈上升趋势,在太空茄子叶黄酮含量为 13.4 μg/mL 时,ABTS<sup>+</sup>· 清除率趋于平缓,达到 97%左右。由表 4 可知,IC<sub>50</sub> 值可确定 ABTS<sup>+</sup>· 清除能力大小依次为芦丁>纯化后>纯化前。

3 结论

试验对太空茄子叶黄酮纯化参数及抗氧化活性进行了

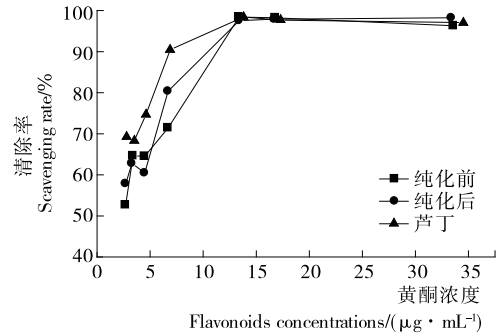


图 9 太空茄子叶黄酮对 ABTS<sup>+</sup>· 的清除率  
Figure 9 Scavenging effects of flavonoids from eggplant leaves on ABTS<sup>+</sup>·

表 4 清除 ABTS<sup>+</sup>· 的 IC<sub>50</sub> 值<sup>†</sup>  
Table 4 The IC<sub>50</sub> values for scavenging ABTS<sup>+</sup>·

| 样品    | 对数回归方程               | R <sup>2</sup> | IC <sub>50</sub> 值/<br>(μg·mL <sup>-1</sup> ) |
|-------|----------------------|----------------|-----------------------------------------------|
| 芦丁    | y=13.636ln(x)+56.367 | 0.828 4        | 0.63                                          |
| 纯化前黄酮 | y=19.345ln(x)+37.801 | 0.874 1        | 1.88                                          |
| 纯化后黄酮 | y=19.069ln(x)+39.77  | 0.885 6        | 1.71                                          |

<sup>†</sup> y 为 ABTS<sup>+</sup>· 清除率,%;ln(x)为纯化前后对应黄酮或芦丁质量浓度的对数。

研究,得出 NKA-II 是分离纯化黄酮的理想吸附剂,吸附平衡时间为 2.5 h;解吸平衡时间为 40 min;在吸附液 pH 为 2.0、浓度为 362.6 μg/mL 时吸附能力最强;pH 值为 3.0、体积分数为 70%的乙醇洗脱效果最好,黄酮解吸率随乙醇体积分数的增加呈先升高后下降的趋势,此变化趋势与前人<sup>[18]</sup>研究结果一致。NKA-II 纯化后黄酮对 ABTS<sup>+</sup>· 清除能力大于纯化前,纯化后黄酮对 DPPH· 清除能力则小于纯化前,纯化前后黄酮对 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH· 清除能力均小于芦丁。使用该方法,效率高、成本低、操作简单,易实现太空茄子叶黄酮工业化生产。后续将对黄酮的组分与结构进行研究,建立 NKA-II 大孔树脂吸附黄酮的动态吸附传质方程,为固定床吸附设备的设计提供参考依据。

参考文献

[1] XIE Chuan-qi, WANG Hai-long, SHAO Yong-ni, et al. Different algorithms for detection of malondialdehyde content in eggplant leaves stressed by grey mold based on hyperspectral imaging technique[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2015, 21(3): 395-407.  
[2] 莫天录,薛林贵,高慧,等. 大孔吸附树脂纯化绿茄叶黄酮的工艺研究[J]. 天然产物研究与开发, 2015, 27(3): 534-539  
[3] 刘一杰,薛永常. 植物黄酮类化合物的研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2016, 36(9): 81-86.  
[4] CZAPLINSKA M, CZEPAS J, GWOZDZINSKI K. Structure antioxidative and anticancer properties of flavonoids[J]. Postepy Biochem, 2012, 58 (3): 235-244.  
[5] 卫静莉,高松平,董梅,等. 柿叶提取黄酮类化合物方法及鉴

- 定[J]. 林业科技开发, 2007, 21(3): 47-49.
- [6] 刘露, 龙媛媛, 郭宗雨, 等. 欧亚旋覆花总黄酮对糖基化终末产物诱导 L929 细胞衰老及 RAGE 表达的影响[J]. 中草药, 2018, 49(3): 626-632.
- [7] 何伟平, 王勤志, 朱晓韵, 等. 茄子提取物对清除自由基作用的研究[J]. 轻工科技, 2012(4): 3-4.
- [8] LIU Chang-qing, JIAO Rui-hua, YAO Ling-yuan, et al. Adsorption characteristics and preparative separation of chaetominine from *Aspergillus fumigatus* mycelia by macroporous resin[J]. Journal of Chromatography B, 2016, 1 015: 135-141.
- [9] 李琼, 陈恺, 陈燕勤, 等. 大孔吸附树脂分离纯化核桃青皮总多酚[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 175-180.
- [10] DONG Yi, ZHAO Mou-ming, SUN-WSTERHOUSE Dong-xiao, et al. Absorption and desorption behaviour of the flavonoids from *Glycyrrhiza glabra* L. leaf on macroporous adsorption resins[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 538-545.
- [11] 高海宁, 李彩霞, 张勇, 等. “黑美人”土豆色素体外抗氧化性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(2): 224-228, 233.
- [12] WU Ya-jun, LIU Jing-jing, GU Su, et al. Orthogonal strategy development using reversed macroporous resin coupled with hydrophilic interaction liquid chromatography for the separation of ginsenosides from ginseng root extract [J]. Journal of Separation Science, 2017, 40(21): 4 128-4 134.
- [13] WU Yuan-feng, ZHANG Lei, MAO Jian-wei, et al. Kinetic and thermodynamic studies of sulforaphane adsorption on macroporous resin[J]. Journal of Chromatography B, 2016, 1 028(15): 231-236.
- [14] TANG Liu, WEI Xing-chen, AN Fa-liang, et al. Preparative separation of TL1-1 from *Dalmanella eschscholzii* extract by macroporous resin and evaluation of its antimicrobial activities[J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1 060(15): 22-29.
- [15] LI Lu, LIU Ju-zhao, LUO Meng, et al. Efficient extraction and preparative separation of four main isoflavonoids from *Dalbergia odorifera* T. Chen leaves by deep eutectic solvents-based negative pressure cavitation extraction followed by macroporous resin column chromatography [J]. Journal of Chromatography B, 2016, 1 033: 40-48.
- [16] 吕英华, 苏平, 那宇, 等. 桑葚色素体外抗氧化能力研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 3(1): 102-107.
- [17] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. Free Radical Biology & Medicine, 1999, 26(1): 1 231-1 237.
- [18] 张冰洁. 金银花叶中黄酮类化合物的提取、纯化及其抗氧化研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.

---

(上接第 152 页)

- [6] 姜永新, 高健, 赵平, 等. 无籽刺梨新鲜果实挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2013(14): 91-94.
- [7] 刘芳舒, 张瑜, 罗昱, 等. 无籽刺梨复合果酱配方工艺技术研究[J]. 食品科技, 2015(1): 107-111.
- [8] 严晓月, 刘星, 李永福, 等. 无籽刺梨酸奶含片工艺研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 226-230.
- [9] 贺红早, 张玉武, 刘盈盈, 等. 无籽刺梨果酒酿制工艺优化初探[J]. 酿酒科技, 2015(11): 91-93.
- [10] 罗昱, 王亮, 丁筑红. 浑浊型无籽刺梨果汁饮料的研制[J]. 食品科技, 2014(11): 91-96.
- [11] 董爱文, 向中, 王国庆. 不同处理的紫藤花萼中黄色素提取及理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(7): 255-259.
- [12] 王钦德. 食品试验设计与统计分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 352-354.
- [13] OLIVEIRA I, BAPTISTA P, MALHEIROR, et al. Influence of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit ripening stage on chemical composition and antioxidant activity[J]. Food Res Int, 2011, 44(5): 1 401-1 407.
- [14] NUNCIO-JÁUREGUI N, MUNERA-PICAZO S, CALÍN-SÁNCHEZ Á, et al. Bioactive compound composition of pomegranate fruits removed during thinning[J]. J Food Compos Anal, 2015, 37: 11-19.
- [15] TAUCHEN J, MARSIK P, KVASNICOVA M, et al. In vitro antioxidant activity and phenolic composition of Georgian, Central and West European wines[J]. J Food Compos Anal, 2015, 41: 113-121.
- [16] 张姣姣, 杜超, 杨维弘, 等. 密蒙花黄色素的提取及其稳定性分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(3): 49-52.
- [17] 许海棠, 廖艳娟, 欧小辉, 等. 密蒙花黄色素的提取及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 218-222.

---

(上接第 157 页)

- [36] 蔡湛, 兰余, 赵淑娟, 等. 紫薯的抗氧化及活性成分研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(1): 43-48.
- [37] TEOW C C, TRUONG V D, MCFEETERS R F, et al. Antioxidant activities, phenolic and  $\beta$ -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours [J]. Food Chemistry, 2007, 103(3): 829-838.
- [38] HWANG Y P, CHOI J H, HAN E H, et al. Purple sweet potatoanthocyanins attenuate hepatic lipid accumulation through activating adenosine monophosphate-activated protein kinase in human HepG2 cells and obese mice[J]. Nutrition Research, 2011, 31(12): 896-906.
- [39] 李润国, 高岩, 单秀峰. 紫甘薯膳食纤维的提取及对自由基的清除作用[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(2): 206-209.
- [40] 周小理, 钱韻芳, 周一鸣. 植物性膳食纤维抗氧化活性的研究与应用[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 158-160.