

P204/正辛醇反胶束萃取 *L*-辛弗林的研究

桑鲁燕^{1*}, 陶仁友², 周小华², 王亚文¹

(1. 菏泽出入境检验检疫局, 菏泽 274000; 2. 重庆大学化学化工学院, 重庆 400044)

摘要: **目的** 建立一种反胶束萃取 *L*-辛弗林的方法, 并验证利用 P204/正辛醇萃取 *L*-辛弗林的有效性。 **方法** 制备 P204/正辛醇反胶束体系萃取枳实 *L*-辛弗林, 反萃取液经浓缩干燥后, 获得纯化 *L*-辛弗林。利用基于单因素实验进行的正交实验研究最佳分离工艺, 通过紫外分析、原子力显微镜表征证实了 P204/正辛醇反胶束体系萃取分离 *L*-辛弗林的有效性。 **结果** 萃取最佳工艺条件为: 水相 pH 值 6.5、萃取时间 15 min、P204 浓度 0.10 mol/L、 $W_0=5$, 此条件下 *L*-辛弗林的单次萃取率为 68.02%, 各影响因素影响顺序为: 水相 pH>P204 浓度> W_0 >萃取时间。纯化后的 *L*-辛弗林纯度达到 87.8%, 比原料纯度提升了 2.9 倍。 **结论** 该方法为 *L*-辛弗林的分离提取提供一种快速低成本方法, 并对其萃取机制及主要变化规律方面提供了基础数据。

关键词: *L*-辛弗林; 反胶束; 萃取

Extraction of *L*-synephrine by P204/octanol reverse micelles

SANG Lu-Yan^{1*}, TAO Ren-You², ZHOU Xiao-Hua², WANG Ya-Wen¹

(1. Heze Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Heze 274000, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method of reverse micelle extraction for *L*-synephrine, and prove the efficiency of extraction by P204/octanol reverse micelle. **Methods** P204/octanol was chosen and prepared for extracting *L*-synephrine, which was extracted from fructus. Purified *L*-synephrine was prepared after reverse extraction, concentration and drying. The optimal conditions of extraction were studied by orthogonal experiment based on single factor experiment. The efficiency of extraction by P204/octanol reverse micelle was proved by UV and AFM spectrum. **Results** The optimum conditions of extraction were as follows: pH of 6.5, extraction time of 15 min, P204 concentration of 0.10 mol/L, and W_0 of 5. The extraction rate was 68.02% at the optimum conditions for one time, and the effecting order was pH>P204 concentration> W_0 >extraction time. The purified *L*-synephrine in reverse extraction was 87.8% after concentration and drying, which was 2.9 times as the raw material. **Conclusion** This method is rapid and low-cost, and provides basic information for the extraction mechanism and the main change rule of *L*-synephrine.

KEY WORDS: *L*-synephrine; reverse micellar; extraction

1 引言

L-辛弗林是源于枳实的活性小分子, 具有减肥、理气、

灭菌等功效^[1], 在医药、食品、保健行业广泛应用。目前分离辛弗林的方法主要为离子交换法和色谱法^[2,3]。用醇酸水溶液处理枳实获得的提取液中尚存大量氨基酸、核苷酸

*通讯作者: 桑鲁燕, 硕士, 工程师, 主要研究方向为化学工程与技术。E-mail: sangly2009@163.com

*Corresponding author: SANG Lu-Yan, Engineer, Technical Center of Heze Entry-Exit Inspection & Quarantine Bureau, No.1000, Zhonghua Road, Mudan District, Heze 274000, China. E-mail: sangly2009@163.com

等荷电分子, 而离子交换树脂的分辨率低而且容易引起 *L*-辛弗林消旋化作用, 从而使辛弗林纯度降低。色谱法仪器成本高, 有机溶剂用量大, 环境压力大。因此有必要研发一种高效、低成本且容易工业化的新方法。

反胶束^[4]是一种表面活性剂, 溶于非极性有机溶剂, 当其浓度超过临界胶束浓度(CMC)时, 自发形成纳米级、热力学稳定、透明的 W/O 体系。反胶束萃取^[5]是利用表面活性剂与被萃取溶质形成相互作用, 实现选择性分离的新技术, 因具有条件温和、操作简单及成本低等优点, 逐渐应用于蛋白质^[6-8]、氨基酸、肽、植物活性成分的分离和纯化^[9-13]。表面活性剂 P204 化学名称为二-(2-乙基己基)磷酸酯, 其分子中磷羟基极性较强, 易电离出 H^+ ; *L*-辛弗林化学名称为 1-(4-羟基苯基)-2-(甲基氨基)乙醇, 其 2-甲基氨基在适当条件下可接受质子带正电荷, 因此两者可形成静电作用, 达到萃取分离的效果。目前文献鲜见利用 P204/正辛醇体系制备反胶束萃取 *L*-辛弗林的报道。本研究利用 P204/正辛醇制备反胶束体系, 并从枳实粗提物中萃取 *L*-辛弗林获得最佳工艺条件, 从而获得一种制备高纯度辛弗林的新方法。

2 材料与方 法

2.1 仪器与试剂

VHX-3 微型旋涡混合器(上海跃进医疗器械厂); 85-1 磁力搅拌器(重庆东悦仪器有限公司); PHS-3C 精密 pH 计(上海精密科学仪器有限公司); JY2002 电子天平、FA1004N 精密电子天平(上海精密科学仪器有限公司); T1901 紫外可见分光光度计(北京普析分析仪器有限公司); TGL-16C 台式离心机(上海安亭科学仪器厂); IPC-208B 型原子力显微镜(重庆恒瑞纳米科技发展有限公司)。

枳实粗提物(纯度 30%, 西安小草植物科技有限公司); *L*-辛弗林标准品(上海朗科植提有限公司); 氯化钾(分析纯, 西陇化工股份有限公司); 正辛醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); TRPO, P204(上海莱雅仕化工有限公司); AOT(嘉善巨枫化工厂); 其他试剂均为分析纯。

2.2 试验方法

2.2.1 制备 *L*-辛弗林萃取液

称取 1.0 g 枳实粗提物(30%)溶于 60 mL 乙醇(95%), 充分溶解后过滤, 滤液经截留分子量为 3000 Da 的超滤膜超滤, 收集滤液用蒸馏水定容至 100 mL 得到 *L*-辛弗林浓度为 3 mg/mL 的溶液, 用蒸馏水进一步稀释控制溶质 *L*-辛弗林的浓度至 0.1 mg/mL。

2.2.2 制备 AOT、TRPO、P204 反胶束

将适量表面活性剂二-(2-乙基己基)琥珀酸酯磺酸钠(AOT)、三烷基氧化膦(TRPO)、二-(2-乙基己基)磷酸(P204)溶于正辛醇或正辛醇中, 控制浓度为 0.10 mol/L, 在缓慢搅拌下加入适量蒸馏水, 使其 W_0 (反胶束体系中水和表面

活性剂的摩尔比)为 10, 搅拌至溶液均匀透明时置于离心机 3000 r/min 下离心 10 min 不分层, 保存备用。

2.2.3 萃取实验

将配制好的 3 种反胶束分别与 0.1 mg/mL 萃取液以 1:1 体积比混合, 分别控制水相 pH 值、KCl 离子浓度、萃取时间, 在室温条件下萃取。将收集的萃余相在离心机 10000 r/min 的转速下离心 10 min, 在 280 nm 波长处测定吸光度 OD_{280} , 从而获得相应浓度, 并采用下式计算萃取率 E 。

$$E = \frac{C_{原} - C_{萃余}}{C_{原}} \times 100\%$$

其中, $C_{原}$ 代表萃取液中 *L*-辛弗林的浓度, mg/mL; $C_{萃余}$ 代表萃余液中 *L*-辛弗林的浓度, mg/mL。

2.2.4 *L*-辛弗林分析

称取 *L*-辛弗林标准品 0.5 g, 加入 5 mL 0.01 mol/L 盐酸并以水定容至 50 mL, 得到 *L*-辛弗林浓度为 10 mg/mL 的标准溶液。吸取上述标准溶液 10 mL 稀释至 100 mL 即得 *L*-辛弗林浓度为 1.0 mg/mL 的标准使用液。分别吸取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL 上述标准使用液于 10 mL 容量瓶并稀释至刻度。以 *L*-辛弗林浓度为横坐标, OD_{280} 为纵坐标绘制标准曲线。图 1 可知, 在 0~0.3 mg/mL 范围内, *L*-辛弗林浓度与吸光度呈线性关系。取待测样品, 同法测定 OD_{280} 并计算 *L*-辛弗林浓度。

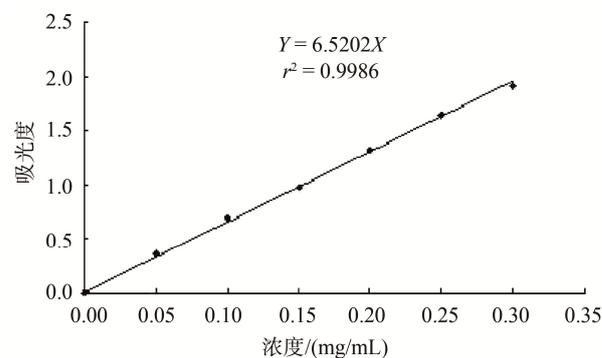


图 1 *L*-辛弗林标准曲线

Fig. 1 Standard curve of *L*-synephrine

3 结果与分析

3.1 萃取 *L*-辛弗林

表 1 是不同反胶束体系下的萃取率 E 。从表 1 可以看出 P204/正辛醇对 *L*-辛弗林的萃取率最高, 达到 36.51%, 其次分别为 TRPO/正辛醇、AOT/正辛醇。从分子结构分析, TRPO 仅有一个 P=O 键, 萃取过程中 *L*-辛弗林分子所含的醇羟基、酚羟基及亚氨基上的氢与上述氧原子形成氢键, 此外, *L*-辛弗林亚氨基上 N 原子含有孤对电子, 上述氧原子空轨道可与其配位实现萃取, 也就是说 TRPO 实现萃取的作用力主要是氢键+配位键。P204 分子可电离出 H^+ ,

表 1 不同反胶束体系下的萃取率
Table 1 Extraction rates of different reversed micelle

反胶束体系	$C_{\text{反}}/(\text{mg/mL})$	$C_{\text{萃取}}/(\text{mg/mL})$	萃取率 $E/\%$
P204/正辛醇	0.10	0.06349	36.51
TPRO/正辛醇	0.10	0.07523	24.77
AOT/正辛醇	0.10	0.08050	19.50

L-辛弗林的亚氨基可接受质子(如图 2), 因此萃取时, $L\text{-XNH}^{3+}$ 和 P204 间可形成静电相互作用, 再加上和上述 TRPO 一致的氢键+配位键相互作用, 故 P204/正辛醇反胶束的萃取效果好于 TRPO/正辛醇反胶束体系。

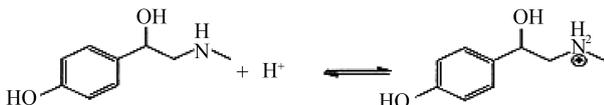


图 2 *L*-辛弗林解离平衡

Fig. 2 Dissociation equilibrium of *L*-synephrine

当采用 AOT/正辛醇反胶束体系进行萃取时萃取率仅有 19.50%, 可能是由于磺酸基中硫原子和氧原子间的电子分布趋于平均化, 造成氧原子上的电负性比 P=O 键上氧原子的电负性小, 磺酸基附近的羰基氧因为会受到该基团的屏蔽, 从而使其完全失去或部分失去成键的能力。

3.2 P204 萃取 *L*-辛弗林的验证

3.2.1 紫外分析

图 3 是 *L*-辛弗林标准品的 UV 光谱图, 由图可知, 标准品的最大吸收峰在 225 nm、274.5 nm 处。图 4 是萃取后的 P204/正辛醇反胶束体系的 UV 光谱图。从图可以看出, 萃取后的 P204/正辛醇反胶束体系在 226 nm、275 nm 波长处出现吸收峰, 这与 *L*-辛弗林标准品光谱图吸收峰相一致, 而 P204/正辛醇反胶束体系是没有紫外吸收的, 从而证明该紫外吸收是由于萃取过程而进入反胶束的 *L*-辛弗林, 这也证实了利用 P204/正辛醇反胶束体系来萃取 *L*-辛弗林的是成功的。

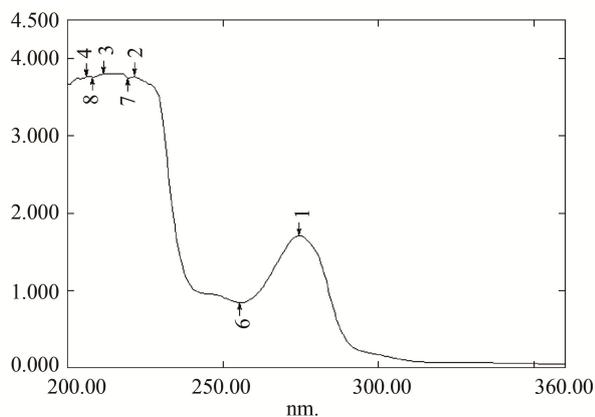


图 3 *L*-辛弗林标准品 UV 光谱

Fig. 3 UV spectrum of standard *L*-synephrine solution

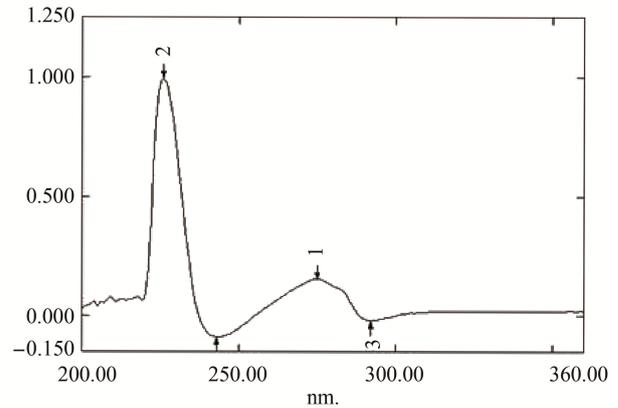


图 4 萃取后反胶束体系紫外光谱图

Fig. 4 UV spectrum of extracted reverse micelle

3.2.2 原子力显微镜(AFM)分析

将萃取后的 P204/正辛醇反胶束在导电玻片上制成致密薄膜, 进行 AFM 形貌观察。图 5 为 AFM 表征的荷载 *L*-辛弗林 P204/正辛醇反胶束体系色阶图。AFM 形貌图中可知, P204 在正辛醇体系中分布均匀, 形成大小均一的球形反胶束, 经测定其直径在 50~80 nm。此外还可以看出在该反胶束体系中, P204 分子和 *L*-辛弗林分子相互靠近, 而且 P204 分子中的 O 原子和 *L*-辛弗林分子的 N 原子“邻近”, 这明显是二者相互作用进行萃取的结果。由此证明, *L*-辛弗林与 P204/正辛醇反胶束分子间萃取作用主要是因为 P204 分子解离产生的阴离子与结合质子上带正电荷的 *L*-辛弗林分子产生的静电作用, 以及 P204 磷氧键上氧原子与 *L*-辛弗林亚氨基氮原子上孤对电子间形成的配位作用。综合 TRPO/正辛醇和 P204/正辛醇反胶束对 *L*-辛弗林的萃取率, 得知 P204/正辛醇萃取过程中静电作用约占 25%, 而配位作用约占 75%。

3.3 最佳萃取条件

3.3.1 萃取时间

控制 W_0 为 10、P204 浓度为 0.12 mol/L 制备相应的 P204/正辛醇反胶束, 调节萃取原料液水相与反胶束的体积比为 1:1, 萃取原液水相 KCl 浓度为 0.1 mol/L, 调节水相 pH 值 6.5, 在萃取时间为单变量的情况下, 得到萃取 *L*-辛弗林的时间进程曲线(图 6)。如图所示, 萃取率随着萃取过程的进行而逐渐增大, 30 min 后达到萃取平衡, 此外还可得知在 15 min 时 *L*-辛弗林萃取率已达 65%, 故综合工业考虑最佳萃取时间为 15 min。

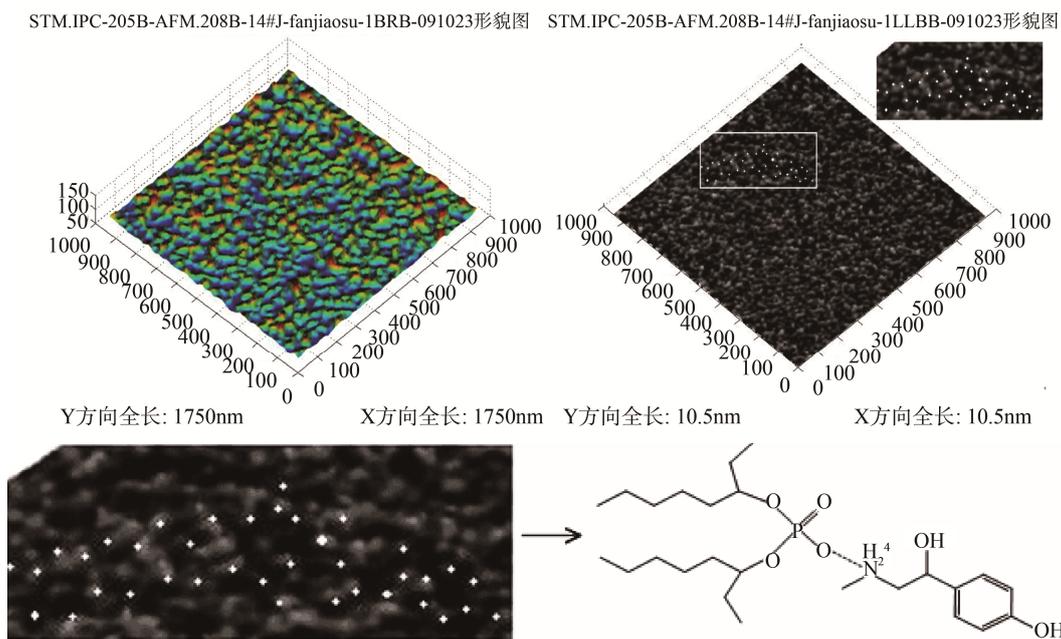


图 5 P204/正辛醇反胶束萃取 L-辛弗林后 AFM 图
Fig. 5 AFM of extracted *L*-synephrine by P204/octanol

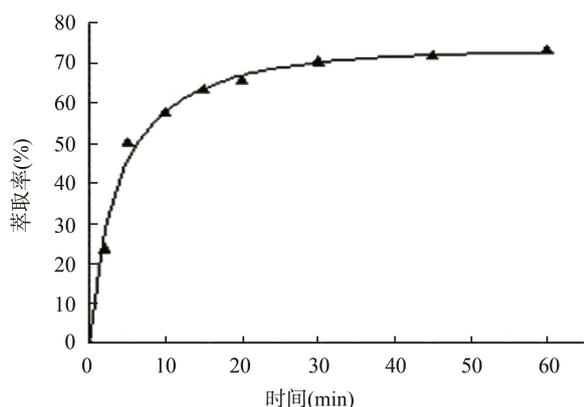


图 6 *L*-辛弗林萃取进程曲线
Fig. 6 Time course curve of *L*-synephrine extraction

L-辛弗林分子带负电荷, 与 P204 相互排斥, 无法实现萃取。综上, pH 6~7 是 *L*-辛弗林萃取最佳 pH。

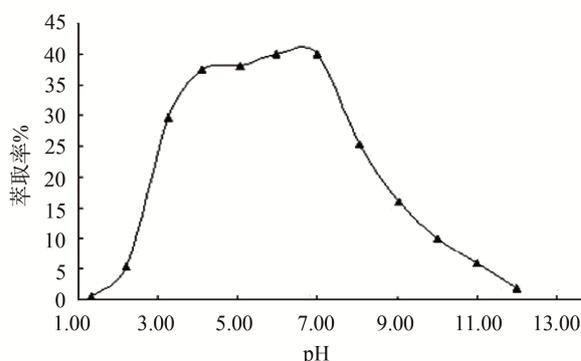


图 7 水相 pH 对萃取率的影响
Fig. 7 Effect of pH on extraction rate

3.3.2 水相 pH 值

图 7 是在水相 pH 值为单变量的情况下, 不同 pH 与 *L*-辛弗林萃取率的关系曲线。由图可见, 在 pH 为 6.0~7.0 时萃取率达到最大值。当 pH 小于 7.0 范围内将抑制 *L*-辛弗林分子中酚羟基的解离, 使的亚氨基容易结合 H⁺ 而带正电荷, 因此促进其与 P204 分子间产生静电相互作用。P204 分子磷一级羟基的电离常数是 7.52×10^{-3} , pK 值约为 2.12, 说明在 pH 2.0~3.0 间 P204 磷羟基上的 H⁺ 会很快解离成阴离子^[14], 于是带正电荷的 *L*-辛弗林分子与之结合而产生静电作用, 所以当 pH 值处于 2.0~3.0 间时萃取率迅速提高。当 pH 在 4.0~7.0 范围内时, P204 已经基本解离完全, 故此随着 pH 的改变对萃取率的影响并不大。而在 pH 大于 7.0 的范围内, *L*-辛弗林分子中酚羟基解离会增加, 从而使

3.3.3 表面活性剂浓度

图 8 是在 P204 浓度为单变量的情况下, P204 浓度对 *L*-辛弗林萃取率的影响曲线, 当 P204 浓度为 0.08 mol/L 时, 萃取率达到最大, 随之萃取率逐渐减小。在含水量不变的情况下, 随着表面活性剂 P204 浓度的增加, 反胶束体系中表面活性剂的密度和数量都相应增加, 因此萃取力增加, 萃取率也随之增大; 但是当表面活性剂浓度过高时, 溶液中就可能形成复杂聚集体, 另一方面反萃取过程的难度也会增强^[15], 从而使得萃取效果降低。故萃取过程表面活性剂的最佳浓度为 0.08 mol/L。

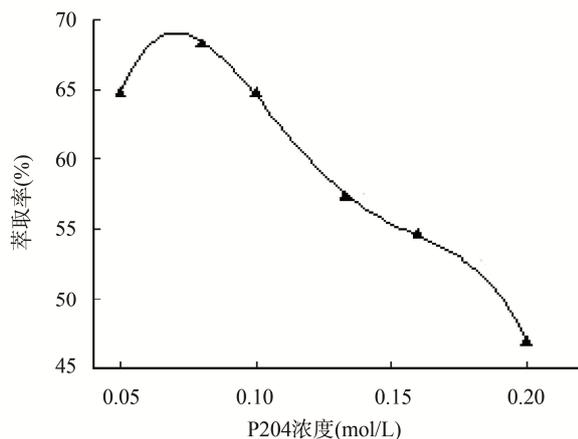


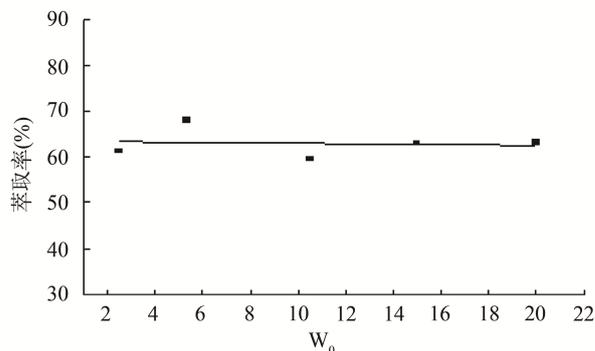
图8 P204浓度对萃取率影响

Fig. 8 Effects of P204 concentration on extraction rate

3.3.4 含水量 W_0 对萃取率的影响

图9是单变量 W_0 对 L -辛弗林萃取率的影响。 W_0 是指反胶束中水和表面活性剂摩尔浓度比值,影响反胶束的尺寸及大小。由图可知, W_0 对萃取率的影响不大。这是由于 L -辛弗林属于小分子结构,查得两 C-C 夹角是 $109^\circ 28'$, C-C 键长为 0.145 nm 、C-O 键长为 0.113 nm 、C-N 键长为 0.117 nm ,经计算其分子直径约为 0.80 nm ,远小于原子力显微镜测的直径 $50\sim 80\text{ nm}$,所以升高 W_0 的值时,虽然水

池含水量变大,体积增大,但对于小分子的 L -辛弗林在空间上影响不大,所以 W_0 对 L -辛弗林萃取率影响不大。

图9 W_0 对萃取率的影响Fig. 9 Effects of W_0 on extraction rate

3.3.5 萃取正交实验

表2是P204/正辛醇反胶束萃取 L -辛弗林的正交实验表。在单因素实验的基础上设计了 $L_{16}(4^4)$ 正交实验,从表中可见,影响率最大的是水相 pH,其余因素依次是 P204 浓度、含水量 W_0 和萃取时间,从而得知利用 P204/正辛醇反胶束进行萃取的最佳条件为 $A_3B_3C_1D_2$,即水相 pH 值 6.50 , W_0 为 5 , P204 浓度为 0.10 mol/L ,萃取时间为 5 min ,在此条件下 L -辛弗林萃取率为 68.02% 。

表2 萃取正交实验结果分析表
Table 2 Analysis of the orthogonal test of extraction

实验号	pH 值(A)	含水量 W_0 (B)	时间/min(C)	P204 浓度/(mol/L)(D)	萃取率/%
1	5.5(1)	5(1)	5(1)	0.08(1)	64.33
2	5.5	10(2)	10(2)	0.10(2)	66.17
3	5.5	15(3)	15(3)	0.12(3)	65.87
4	5.5	20(4)	20(4)	0.15(4)	58.26
5	6.0(2)	5	10	0.12	55.67
6	6.0	10	5	0.15	21.41
7	6.0	15	20	0.08	54.76
8	6.0	20	15	0.10	48.94
9	6.5(3)	5	15	0.15	48.01
10	6.5	10	20	0.12	60.57
11	6.5	15	5	0.10	68.02
12	6.5	20	10	0.08	59.35
13	7.0(4)	5	20	0.10	51.57
14	7.0	10	15	0.08	50.01
15	7.0	15	10	0.15	62.44
16	7.0	20	5	0.12	65.55
均值 1	63.655	54.892	59.825	57.107	59.145
均值 2	50.195	54.540	60.983	58.675	58.623
均值 3	58.985	62.850	53.207	61.915	54.547
均值 4	57.470	58.022	56.290	52.607	57.990
极差	13.460	8.310	7.776	9.308	4.598

3.4 L-辛弗林的纯化

向荷载 L-辛弗林的 P204/正辛醇反胶束加入反萃取液(其中反萃取液和反胶束的体积比为 2 : 1, pH 为 10, KCl 浓度 0.6 mol/L), 反相萃取 30 min 后收集反萃液, 经浓缩、干燥后获得 L-辛弗林冻干粉, 用 2.3 法测的反萃液中 L-辛弗林纯度, 约为 87.8%, 因积实粗体物中 L-辛弗林纯度仅 30%, 故通过对原料积实粗体物净化以及利用 P204/正辛醇反胶束萃取后, 纯度提高了 2.9 倍。

4 结 论

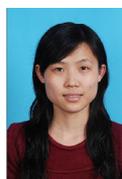
本文以 P204/正辛醇反胶束体系萃取 L-辛弗林的最佳工艺条件为: 水相 pH 值 6.5, 萃取时间 15 min, 表面活性剂浓度 0.10 mol/L, W_0 为 5。经过对反萃取后最终 L-辛弗林纯度提高至 87.8%, 纯化倍数为 2.9。该研究为 L-辛弗林提供了一种新型、环保、低成本的分离提取方法, 对于其萃取机制及主要变化规律提供了基础数据, 不但丰富了利用反胶束萃取的理论, 而且分离产物 L-辛弗林在食品、医药、保健等领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Rossato LG, Costa VM, Limberger RP, *et al.* Synephrine: From trace concentrations to massive consumption in weight-loss [J]. *Food Chem Toxicol*, 2010, 49(1): 8–16.
- [2] 沈莲清, 张超. 个青皮中辛弗林两种提取分离方法的比较研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2008, 27(6): 14–17.
Shen LQ, Zhang C. Study on comparison of two methods for the extraction and separation of synephrine from fructus citri Immaturus [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2008, 27(6): 14–17.
- [3] 高荫榆, 魏强, 范青生, 等. 高速逆流色谱分离提取天然产物技术研究进展[J]. *食品科学*, 2008, 29(2): 461–465.
Gao YY, Wei Q, Fan QS, *et al.* Advances of high-speed countercurrent chromatography on separation of natural products [J]. *Food Sci*, 2008, 29(2): 461–465.
- [4] 王丽敏, 陈复生, 刘昆仑. 反胶束结构的研究进展[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 226–230.
Wang LM, Chen FS, Liu KL. Advancement of reverse micelle structure [J]. *Food Ind*, 2015, 36(7): 226–230.
- [5] 郭晓歌, 赵俊廷. 反胶束萃取氨基酸的研究进展[J]. *食品工程*, 2007, (4): 12–14.
Guo XG, Zhao JT. Research progress on amino acids extraction using reversed micelles [J]. *Food Eng*, 2007, (4): 12–14.
- [6] 杨光胜, 陈复生, 张丽芬. 不同反胶束体系萃取大豆蛋白研究[J]. *粮食与油脂*, 2014, 27(8): 45–48.
Yang GS, Chen FS, Zhang LF. Reserch on backward extraction of soy protein by different reverse micelle systems [J]. *Cereals Oils*, 2014, 27(8): 45–48.
- [7] Takumi K, Aki K, Emiko M, *et al.* Effects of ion species in aqueous phase on protein extraction into reversed micellar solution[J]. *Sep Purif Technol*, 2003, 31(3): 251–259.
- [8] 王永涛, 赵国群, 张桂. 反胶束萃取技术及其在食品中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2008, 29(7): 171–173.
Wang YT, Zhao GQ, Zhang G. Reverse micelles technology and its application in food science [J]. *Food Res Dev*, 2008, 29(7): 171–173.
- [9] Liu JG, Xing JM, Shen R, *et al.* Reverse micelles extraction of nattokinase from fermentation [J]. *Biochem Eng J*, 2004, 21(3): 273–278.
- [10] 杨趁仙, 刘昆仑, 陈复生, 等. 反胶束萃取植物蛋白质结构与功能特性研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(12): 10–13.
Yang CX, Liu KL, Chen FS, *et al.* Research advances on the structure and functional properties of plant proteins extracted by reverse micelles [J]. *Cereals Oils*, 2013, 26(12): 10–13.
- [11] 杨颖莹, 布冠好, 陈复生, 等. 不同反胶束体系特性研究[J]. *粮食与油脂*, 2012, (12): 9–12.
Yang YY, Bu GH, Chen FS, *et al.* Studies on properties of different reverse micelles [J]. *Cereals Oils*, 2012, (12): 9–12.
- [12] 许林妹, 许虎君, 卢青松, 等. Gemini 型阳离子表面活性剂反胶束体系萃取纤维素酶的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(2): 72–76.
Xu LM, Xu HJ, Lu QS, *et al.* Study of extraction cellulase by reverse micellar system of gemini cationic Surfactant [J]. *Food Sci*, 2006, 27(2): 72–76.
- [13] Dong LC, Li WP, Zhou XH, *et al.* Liquid-liquid extraction of matrine using TRPO/cyclohexane reverse micelles [J]. *Braz J Chem Eng*, 2009, 26(2): 415–425.
- [14] Dong LC, Huang SJ, Luo Q, *et al.* Glutathione extraction and mass transfer in di-(2-ethylhexyl) ammonium phosphate/octanol reverse micelles [J]. *Biochem Eng J*, 2009, 46(2): 210–216.
- [15] 严希康. 生化分离工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
Yan XK. *Bioseparation Engineering* [M]. Beijing: Beijing Chemical Publishing House, 2001.

(责任编辑: 金延秋)

作者简介



桑鲁燕, 硕士, 工程师, 主要研究方向为化学工程与技术。

E-mail: sangly2009@163.com