

微波联合纤维素酶提取艾叶挥发油的研究

Extraction of *Artemisia argyi* volatile oil with microwave-assisted enzyme method

易雪静¹ 刘刚¹ 龚铮午²

YI Xue-jing¹ LIU Gang¹ GONG Zheng-wu²

(1. 岳阳职业技术学院岳阳市洞庭湖区特色中药材综合利用重点实验室, 湖南 岳阳 414000;

2. 中南林业科技大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

(1. Comprehensive Utilization Key Lab of Chinese Herbal Medicine of Yueyang Dongting Lake Area, Yueyang Vocational & Technical College, Yueyang, Hunan 414000, China; 2. College of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:为了提高艾叶挥发油的提取率,采用微波联合纤维素酶的提取方法,探讨酶解时间、温度和微波处理功率等因素对提取率的影响,并通过正交试验对提取工艺进行优化,同时采用气相色谱—质谱(GC—MS)法对艾叶挥发油的成分进行分析。结果表明:当酶解时间 60 min、酶解温度 45 ℃、微波处理时间 10 min、微波功率 250 W、酶液用量 0.9% 和缓冲液 pH 值 4.0 时,挥发油的平均提取率可达 3.61%,与无微波处理的相比提高了 1.25%。GC—MS 的分析结果显示:采用该方法提取的艾叶挥发油主要由苯甲酰甲酸乙酯、匙叶桉油烯醇和邻苯二甲酸等物质组成,其含量分别为 11.68%, 5.24%, 4.31%。

关键词:艾叶;挥发油;微波;酶法提取

Abstract: Microwave-assisted enzyme method was adopted to improve the extraction ratio of *Artemisia argyi* volatile oil, the effects of enzyme extraction time, temperature, and microwave power on the extraction ratio had discussed. The extraction process was optimized with orthogonal experiment, and the ingredient of *Artemisia argyi* volatile oil had analyzed. The results showed that the microwave-assisted process had the benefit to get a higher extraction ratio as 60 min enzyme extraction time, 45 ℃ enzyme extraction temperature, 10 min microwave processing time, 250 W microwave power, 0.9% cellulase dosage and pH 4.0 buffer solution. The average extraction ratio was 3.61% which increased 1.25% comparing with the sample without microwave treatment. The analysis of GC—MS indicated that the main content of volatile oil was composed of ethyl

benzoylformate, spathulenol and phthalic acid, which was 11.68%, 5.24% and 3.94%, respectively.

Keywords: *Artemisia argyi*; volatile oils; microwave; enzyme method extraction

艾叶是多年生菊科草本植物艾的干燥叶,具有浓烈的香气,其挥发油不仅具有抗菌、止血、平喘、抗过敏和镇咳等功能^[1],而且还是香料工业、食品工业及化学工业的重要原料,具有广阔的应用前景,国内外学者对其开展了大量的研究^[2-3]。

目前,提取挥发油的常用方法多为水蒸汽蒸馏法和有机溶剂萃取法等,但存在提取率低、时间长等不足。随着化工与生物科技的发展,微波与酶法在生物质材料提取方面得到了较大的发展。微波辅助提取借助高频电磁波穿透萃取媒质到达提取物料的内部,使提取成分加速向提取溶剂界面扩散而使提取速率提高^[4]。Delazar 等^[5]在介绍微波辅助提取天然产物的方法时认为提取时间短、有机溶剂使用少、高提取率和低成本是其最大的特点;Afoakwah 等^[6]研究使用微波辅助法从植物中提取抗氧化物时探讨了乙醇浓度、用量、微波功率、提取时间等对得率的影响。Viorica 等^[7]采用微波辅助法从土壤和地质沉积物中提取有机复合物时发现,使用微波辅助提取得率可提高 20%~23%。与微波提取相比,酶法提取则是在温和的条件下使有效成分充分溶解、混悬于溶剂中从而达到提高提取率^[8-9],同时又能较好地保持提取物的生物活性。Nanna 等^[10]研究了酶法在提取 *k*- λ -角叉菜胶、琼脂和藻朊酸盐等方面的应用;而 Zuerro 等^[11]在研究酶法从西红柿中提取番茄红素时发现,在 25 ℃ 时,先酶解 5 h 再提取 3 h 的得率为 75.6%,当将酶解时间延长至 12~18 h 后,得率可达 85%~90%。

基金项目:湖南省教育厅资助项目(编号:13c974)

作者简介:易雪静,女,岳阳职业技术学院讲师,硕士。

通讯作者:龚铮午(1951—),男,中南林业科技大学教授,研究生导师。E-mail: yixuejing8112@163.com

收稿日期:2015-11-18

微波联合酶法是将微波法和生物酶结合起来进行提取的一种联用技术,将生物酶与微波相结合,可显著提高提取率^[12-13],而关于微波联合纤维素酶提取艾叶挥发油的研究还未见报道。本研究拟以艾叶为原料,采用微波和纤维素酶联合提取其挥发油。通过探讨微波处理时间、微波功率、酶解时间、温度等因素对挥发油提取率的影响,获取最佳工艺参数,旨在达到加快速度、提高提取率的目的。

1 材料与方法

1.1 原料与设备

艾叶:8 月份采摘于湖南岳阳;
纤维素酶: 2×10^4 U/mL,诺维信(中国)生物技术有限公司;
所用试剂均为分析纯,市售;
微型植物试样粉碎机:FZ102 型,天津泰斯特仪器有限公司;
数显水浴恒温振荡器:SHZ-82 型,金坛市岸头良友实验仪器厂;
常压微波合成/萃取反应工作站:MAS-II 型,上海新仪微波化学科技有限公司;
气相质谱色谱仪:GCMS-QP2010 PLUS 型,日本岛津企业管理(中国)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 艾叶挥发油的提取 将艾叶干燥后粉碎至 80 目,准确称取 20 g,加入 200 mL 醋酸—醋酸钠缓冲溶液^[14],调节 pH 值后置于常压微波合成/萃取反应工作站中,在一定功率的微波下处理一定的时间。待混合液冷却至室温后加入不同质量分数的纤维素酶,搅匀,置于恒温水浴锅中,在一定的温度下提取一定时间,直到冷凝器中挥发油含量不再增加为止。收集上层油相,加入 Na₂SO₄ 干燥后得棕黄色的挥发油,测定并计算提取率。在一定的温度下,采用水蒸汽蒸馏法提取艾叶挥发油^[15],并比较不同方法对艾叶挥发油提取率的影响。提取率按式(1)计算^[16]:

$$C = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:
C —— 挥发油提取率,%;
 m_1 —— 挥发油质量,mg;
 m_2 —— 艾叶质量,mg。

1.2.2 GC—MS 检测试样制备 将 1 μ L 艾叶挥发油置于 1 mL PCR 管中,并用乙醇稀释至 1 mL,再取其中的 25 μ L 用乙醚稀释至 0.5 mL,加入 Na₂SO₄ 除水,取 1 μ L 进行 GC—MS 分析。

1.2.3 GC—MS 检测条件

(1) 色谱条件:HP25MS 弹性石英毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m);载气为高纯氮气,流速 0.8 mL/min;进样口温度 250 $^{\circ}$ C;程序升温:60 $^{\circ}$ C 之前 10 $^{\circ}$ C/min,60 $^{\circ}$ C 时保持 5 min;然后以 4 $^{\circ}$ C/min 的速度升温到 100 $^{\circ}$ C,保持 7 min;再以 5 $^{\circ}$ C/min 的速度升温到 250 $^{\circ}$ C 保持 5 min;进样量 1 μ L;分流比 1:50。

(2) 质谱条件:EI 离子源,电离电压 70 eV,温度 250 $^{\circ}$ C,传输线温度为 220 $^{\circ}$ C;扫描速率 3 scan/s、范围 45 $\sim$ 350 (m/z);溶剂延迟时间 5 min。

1.2.4 单因素试验设计 在探索性试验的基础上,以艾叶中挥发油的提取率为指标,采用单因素试验,考察微波处理时间、微波功率、酶解温度、酶液用量、酶解时间和缓冲液 pH 值对挥发油提取率的影响,以确定提取艾叶挥发油的最佳条件。

(1) 微波处理时间和功率的筛选:在酶解温度 45 $^{\circ}$ C、酶液用量 0.9%、酶解时间 60 min 和缓冲液 pH 值 4.0 的条件下进行试验,对微波功率和微波处理时间分别为 150,200,250,300 W 和 4,6,8,10,12 min 的提取条件进行筛选。

(2) 酶解温度和酶液用量的筛选:在微波处理时间 10 min、微波功率 250 W、酶解时间 60 min 和缓冲液 pH 值 4.0 的条件下,分别对酶解温度为 35,40,45,50 $^{\circ}$ C 和酶液用量为 0.3%,0.5%,0.7%,0.9%,1.1%时的提取条件进行筛选。

(3) 缓冲液 pH 值和酶解时间的筛选:在微波处理时间 10 min、微波功率 250 W、酶解温度 45 $^{\circ}$ C 和酶液用量 0.9%的条件下进行试验,筛选 pH 值为 3.5,4.0,4.5,5.0 和酶解时间为 30,40,50,60,70 min 时艾叶挥发油的提取条件。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

2.1.1 微波处理时间和功率对提取率的影响 微波处理能使有液泡类的细胞瞬间膨胀破裂,使胞内物质释放出来,有助于快速提取^[17]。由图 1 可知:微波功率较低时,挥发油提取率较低;随着功率的增加,挥发油提取率不断升高,其中 250 W 的提取率最高,300 W 的反而有所降低。同时,从图 1 中还发现:当功率为 250 W 时,处理 10 min 后提取率有降低趋势。这是因为在微波处理的过程中,部分细胞因微波的作用而产生裂纹并将胞内物质释放,同时纤维素酶也会通过这些裂纹通道进入到胞腔内,这无疑增大了纤维素酶与艾叶的接触面积,因此有利于挥发油的提取。但随着时间的延长,胞内物质释放量减少,副产物会逐步增加而影响提取率^[18-19]。所以,在本试验条件下微波处理时间选择 10 min。

2.1.2 酶解温度和酶液用量对提取率的影响 升高温度能

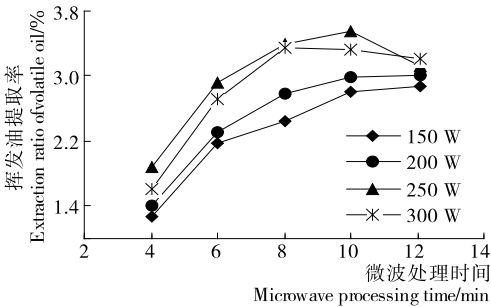


图 1 微波处理时间和功率对提取率的影响
Figure 1 Effects of microwave-assisted time and power on the yield of volatile oil

够提高反应体系的活化分子数,因此合适的提取温度十分重要。由图 2 可知:随着温度升高,艾叶挥发油的提取率逐渐增加,并在 45 ℃ 附近达到 3.47%;但当温度继续升高,提取率降低。这可能是温度偏低时,酶液的活性较差,而温度较高时,又易使部分酶失活^[20-21]以及加速挥发油氧化与分解所致,因此只有酶液在合适的温度条件下才能够充分发挥其效能。从图 2 中还可可见:在多种温度条件下,当酶液用量低于 0.9% 时,随着酶液用量的增加,提取率明显增加,但超过此值时,挥取率增加缓慢,这可以解释为在 0.9% 左右时酶液与底物的比例处于最佳状态,而更多的酶液则无法充分发挥作用。因此,选用 0.9% 的酶液用量作为后续试验参数。

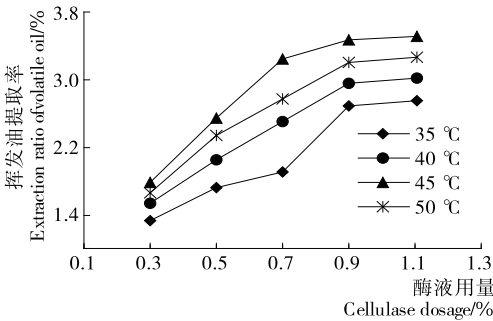


图 2 酶解温度和酶液用量对提取率的影响

Figure 2 Effects of enzyme extraction temperature and enzyme dosages on the yield of volatile oil

2.1.3 缓冲液 pH 值和酶解时间对提取率的影响 由图 3 可知:在酶解时间 60 min、缓冲液 pH 值 4.0 左右时的艾叶挥发油提取率较高,pH 值超过 4.0 后减少,这可能是 pH 值 4.0 左右时酶的活性较高的缘故。同时,图 3 中还显示:在缓冲液 pH 值 4.0 时,随着提取时间的延长,挥发油提取率逐渐增加,当酶解时间超过 60 min 后再延长时间对提取率影响不明显,这可解释为酶解作用是一种比较缓慢与温和的反应,延长酶解时间有利于酶液与底物的充分接触,从而能更好地发挥酶液的作用。但随着时间的延长,也会因挥发油中部分成分被氧化而降低提取率。同时,通过 60 min 的酶解,残留在艾叶中的挥发油已经很少,即使延长提取时间也难以提高得率,因此选择 60 min 为酶解时间。

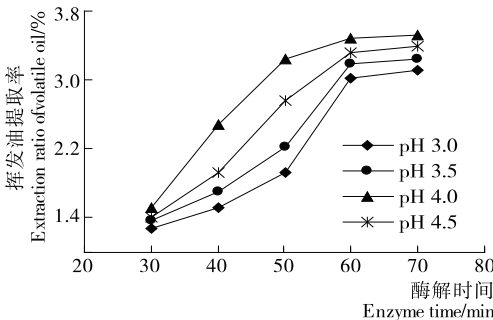


图 3 缓冲液 pH 值和酶解时间对提取率的影响

Figure 3 Effects of pH value of buffer solution and enzyme extraction time on the yield of volatile oil

2.2 正交试验分析与讨论

2.2.1 正交试验结果分析 由图 2 中可见,在不同提取温度条件下,酶液用量超过 0.9% 后艾叶挥发油提取率增加量均很小。同时,从图 3 中可知,当酶解时间超过 60 min 后,缓冲液 pH 值对艾叶挥发油提取率的影响较小,但 pH 值为 4.0 左右时提取率较高,因此选取 pH 值 4.0 作为试验条件。

在单因素试验的基础上,选取酶解时间、酶解温度、微波处理时间和微波功率 4 个对挥发油得率影响较大的因素作为正交试验的因素,采用 $L_{16}(4^5)$ 表进行正交试验设计,因素与水平设计见表 1,试验结果见表 2。

由表 2 可知:各因素对艾叶挥发油提取率的影响为 $B > D > A > C$,且最佳工艺组合为: $B_2D_2A_1C_2$,即:酶解时间 60 min、酶解温度 45 ℃、微波处理时间 10 min、微波功率 250 W、酶液用量 0.9% 和缓冲液 pH 4.0。按上述最优条件追加 3 次验证实验,得到挥发油的平均提取率为 3.61%。同时,在其

表 1 正交试验的因素与水平设计

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	A 酶解时间/min	B 酶解温度/℃	C 微波处理时间/min	D 微波功率/W
1	45	43	8	230
2	50	45	10	250
3	55	47	12	270
4	60	49	14	290

表 2 提取挥发油的正交试验结果

Table 2 Orthogonal experiment result of volatile oils

序号	A	B	C	D	E(空列)	提取率/%
1	1	1	1	1	1	2.84
2	1	2	2	2	2	3.50
3	1	3	3	3	3	3.03
4	1	4	4	4	4	2.98
5	2	1	2	3	4	3.08
6	2	2	1	4	3	3.14
7	2	3	4	1	2	3.23
8	2	4	3	2	1	3.30
9	3	1	3	4	2	2.97
10	3	2	4	3	1	3.13
11	3	3	1	2	4	3.19
12	3	4	2	1	3	3.13
13	4	1	4	2	3	3.30
14	4	2	3	1	4	3.33
15	4	3	2	4	1	3.40
16	4	4	1	3	2	3.18
k_1	3.09	3.05	3.09	3.13	3.17	
k_2	3.19	3.28	3.28	3.33	3.22	
k_3	3.11	3.21	3.16	3.11	3.15	
k_4	3.30	3.15	3.16	3.12	3.15	
R	0.21	0.23	0.19	0.22	0.07	

它工艺条件相同的情况下,没有微波处理的提取率仅有 2.36%,两者相差 1.25%,提高率为 34.5%。显然,采用微波处理有助于提高挥发油的提取率。

2.2.2 正交试验结果讨论 由表 3 可知:微波处理时间的 F 值=5.274,小于 5.39,表现为不显著。酶解时间、酶解温度和微波功率则对试验结果影响显著,其中微波功率的显著性为 0.053 表现为最显著,酶解温度与时间的显著性比较接近。

表 3 方差分析结果[†]

Table 3 Results of variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
A	0.116	3	0.039	8.185	0.059
B	0.113	3	0.038	8.030	0.060
C	0.074	3	0.025	5.274	0.103
D	0.125	3	0.042	8.823	0.053
误差项	0.014	3	0.005		

[†] 在 0.1 的水平下,查 F 值分布表得 $F_{0.10}(3,3)=5.39$;以均方和最小的空白列为误差项。

2.3 挥发油成分分析

图 4 为艾叶挥发油总离子图谱。同时,经 NIST 标准谱图库检索,鉴定出其中含量较高的 38 种成分,其中苯甲酰甲酸乙酯含量最高(11.68%),匙叶桉油烯醇次之,具体成分见表 4。实际上,艾叶挥发油中含有大量的活性物质,会受到温度、光照等因素的影响而会发生氧化、分解等,由此可见,挥发油的成分与提取工艺密切相关。同时,挥发油的成分还与艾叶的产地、采摘季节等相关^[16]。

3 结论

采用微波联合纤维素酶提取艾叶挥发油,既能充分利用微波快速提取的优势,也能发挥酶法提取能够保留艾叶挥发油有效成分的特点。在本试验条件下,酶解时间、酶解温度和微波功率等因素对艾叶挥发油的得率影响较大。通过正交试验分析,得到较优的提取工艺为:酶解时间 60 min、酶解温度 45℃、微波功率 250 W、微波处理时间 10 min、酶液用量 0.9%和缓冲液 pH 值 4.0,与没有微波处理的相比平均提取率提高了 34.5%。同时,通过 GC—MS 对艾叶挥发油成分分析发现苯甲酰甲酸乙酯、匙叶桉油烯醇和邻苯二甲酸等 3 种化合物的含量较高。

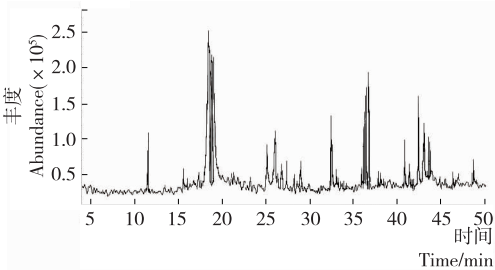


图 4 艾叶挥发油的总离子流色谱图

Figure 4 Total ion Chromatogram of volatile oils extracted from *Artemisia argyi* leaves

表 4 艾叶挥发油的化学成分				
Table 4 The chemical composition of volatile oils from <i>Artemisa argyi</i> leaves				
序号	保留时间/min	化合物名称	质量分数/%	匹配度/%
1	48.72	11,15-二甲基三十五烷	1.27	99
2	28.12	1,3-(2-氢)-二酮-2-氨基-1-氢-1-吡啶	0.29	98
3	15.62	戊二醇	2.06	92
4	36.38	α -紫穗槐烯	0.45	88
5	15.95	双环[2,2,1]-2-庚醇	1.04	95
6	32.32	β -桉澄茄烯	1.52	92
7	22.91	(-)-乙酸龙脑酯	2.60	89
8	28.42	邻苯二甲酸单乙酯	1.91	78
9	17.16	2-甲基-5-(1-甲基乙基)-2-环己醇	0.73	90
10	44.15	β -木香醇	1.67	86
16	32.44	β -石竹烯	0.82	93
12	36.22	α -巴草烯	1.85	94
13	18.49	邻苯二甲酸酐	1.86	92
14	42.61	胆山烯醇	0.64	94
15	21.92	薄荷酮	2.19	95
16	34.91	1-氢-茛-1,2,3-三酮	0.23	96
17	26.13	茛三酮	0.67	99
18	37.62	3,4-二甲基环己醇	1.24	96
19	26.35	邻苯二甲酸甲酯	3.16	95
20	27.19	邻苯二甲酸	3.94	84
21	48.44	2-(亚胡椒基氨)安替比林	1.26	86
22	28.25	蛇床烷-6-烯-4-醇	1.17	83
23	38.81	δ -杜松烯	0.18	82
24	17.41	GAMMA-萜品烯	2.31	88
25	29.72	β -蛇床烯	2.16	78
26	36.03	顺-异丁子香酚	0.51	82
27	32.91	石竹烯醇	0.73	90
28	48.28	二环大根香叶烯	3.91	94
29	35.52	桉树脑	2.11	95
30	11.54	匙叶桉油烯醇	5.24	78
31	44.18	二环榄香烯	0.60	76
32	26.03	3-胆甾烷酮	1.03	95
33	46.45	还原茛满三酮	2.85	93
34	41.22	苯甲酰甲酸乙酯	11.68	95
35	16.07	龙脑	3.92	94
36	18.21	顺式-5-(1-甲基乙烯基)-2-甲基-2-环己烯醇	2.81	89
37	17.59	4-萜烯醇	1.53	91
38	26.31	α -丁香烯	1.31	86

参考文献

[1] 阳一兰, 石峰, 詹国平, 等. 艾叶挥发油的提取及其化学成分分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(12): 5 267-5 271.

[2] Guan Wen-qiang, Li Shu-fen, Yan Rui-xiang, et al. Comparison of composition and antifungal activity of *Artemisia argyi* Lévl. et Vant inflorescence essential oil extracted by hydrodistillation and supercritical carbon dioxide[J]. Natural Product Research: Formerly Natural Product Letters, 2006, 20(11): 992-998.

[3] Hageman R H, Waygood E R. Methods for the extraction of enzymes from cereal leaves with especial reference to the triosephosphate dehydrogenases[J]. Plant Physiology, 1959, 34(4): 396-400.

[4] 张春红, 许宁, 杨悦, 等. 微波辅助法提取野生软枣猕猴桃茎黄酮的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2011, 32(12): 335-337.

[5] Delazar A, Nahar L, Hamedeyazdan S, et al. Microwave-assisted extraction in natural products isolation[J]. Methods in Molecular Biology, 2012, 864: 89-115.

[6] Afoakwah A N, Owusu J, Adomako C, et al. Microwave assisted extraction (MAE) of antioxidant constituents in plant materials [J]. Global Journal of Bio-Science & Biotechnology, 2012, 1(2): 132-140.

[7] Viorica L A, Richard Y, Werner F B. Microwave-assisted extraction of organic compounds from standard reference soils and sediments [J]. Analytical Chemistry, 1994, 66(7): 1 097-1 106.

[8] 汪志慧, 孙智达, 谢笔钧. 响应曲面法优化双酶法提取莲房原花青素[J]. 食品科学, 2011, 32(4): 64-68.

[9] 周小楠, 董群. 正交试验优化酶法提取金银花多糖工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 119-121.

[10] Nanna R K, Marcel T A, Anne S M. Seaweed Hydrocolloid Production: An Update on enzyme assisted extraction and modification technologies[J]. Marine Drugs, 2015, 13(5): 3 340-3 359.

[11] Zuorro A, Lavecchia R. Mild enzymatic method for the extraction of lycopene from tomato paste[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2010, 24(2): 1 854-1 857.

[12] 蔡延渠, 朱盛山, 李润泽. 新型提取联用技术在中药提取中的应用进展[J]. 中成药, 2011, 33(5): 863-866.

[13] 揭广川, 陈红杰, 李必金. 微波辅助复合酶法提取草菇中的风味物质[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 164-166.

[14] 陈健, 欧阳玥, 闫静. 磷酸盐缓冲溶液对邻二氮菲—Fe²⁺氧化法测定羟基自由基的影响[J]. 分子科学学报, 2012, 28(4): 350-352.

[15] 孙玉亮, 池建淮, 万毅. 艾叶挥发油提取工艺的研究进展[J]. 淮海医药, 2012, 30(4): 374-375.

[16] 洪宗国, 魏海胜, 张令令, 等. 不同采集期艾叶挥发油含量和化学成分的研究[J]. 中南民族大学学报: 自然科学版, 2013, 32(2): 32-35.

[17] 童红, 唐军, 张正方. 响应面法优化微波辅助水蒸气提取薰衣草挥发油的工艺研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(10): 61-65.

[18] 李灵凤, 翟新, 金光远, 等. 真空微波破裂植物细胞壁的力学模型[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 18-22.

[19] 席彩彩, 张文芳, 侯明月, 等. 微波技术在植物胞内有效成分提取中的应用[J]. 中国药业, 2014, 23(3): 94-96.

[20] 孟利娜, 于敏, 许静. 酶法辅助提取北苍术挥发油的工艺及成分分析[J]. 中成药, 2013, 35(4): 844-847.

[21] Yu Xian-chun, Sun De-lin, Li Xiang-su. Preparation of furfural through the hydrolysis of rice hull using a combined biological and chemical approach[J]. Asian Journal of Chemistry, 2012, 24(4): 1 743-1 746.

(上接第 68 页)

[9] Zhu Wei-xia, Yang Ji-zhou, Liu Ya-feng, et al. Simultaneous determination of 13 aminoglycoside residues in foods of animal origin by liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry with two consecutive solid-phase extraction steps[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1 207(1/2): 29-37.

[10] 宋佩, 孟萌, Sergei A Eremin, 等. 荧光偏振免疫分析方法快速检测沙拉沙星残留[J]. 分析化学, 2012, 40(8): 1 247-1 251.

[11] 王书源, 李忠海, 付湘晋, 等. 高荧光 CdTe 量子点荧光探针测定 Cu²⁺ [J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 125-129.

[12] 李萌立, 李忠海, 李节, 等. 量子点荧光探针技术在食源性致病菌检测中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 241-244.

[13] 毛永强, 李卓然, 王继仁, 等. 基于 CdTe 量子点内滤效应同步荧光猝灭法测定四环素[J]. 分析测试学报, 2015, 34(1): 96-100.

[14] Vaishnavi E, Renganathan R. CdTe quantum dot as a fluorescence probe for vitamin B₁₂ in dosage form[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2013, 115(11): 603-609.

[15] 元晓云, 王天伦, 关婷婷, 等. 以 CdTe 量子点为荧光探针测定黄瓜中链霉素的残留量[J]. 分析测试学报, 2015, 34(4): 463-467.

[16] Ge Shen-guang, Lu Juan-juan, Ge Lei, et al. Development of a novel deltamethrin sensor based on molecularly imprinted silica nanospheres embedded CdTe quantum dots[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2011, 79(5): 1 704-1 709.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22969—2008 奶粉和牛奶中链霉素、双氢链霉素和卡那霉素残留量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(上接第 153 页)

[18] 郭守军, 杨永利, 黄惠萍, 等. 乌榄种仁油的提取工艺及脂肪酸组成[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 88-92.

[19] 蔡红燕, 齐玉堂, 刘英. 燕麦油理化性质及成分分析[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 202-205.

[20] Tong Li-tao, Zhong Kui, Liu Li-ya, et al. Oat oil lowers the plasma and liver cholesterol concentrations by promoting the excretion of faecal lipids in hypercholesterolemic rats[J]. Food Chem. , 2014, 142: 129-134.

[21] Shewry P R, Piironen V, Lampi A M, et al. Phytochemical and fiber components in oat varieties in the HEALTHGRAIN diversity screen[J]. J. Agr. Food Chem. , 2008, 56(21): 9 777-9 784.

[22] Emmons C L, Peterson D M, Paul G L. Antioxidant capacity of oat (*Avena sativa* L.) extracts. 2. In vitro antioxidant activity and contents of phenolic and tocol antioxidants[J]. J. Agr. Food Chem. , 1999, 47(12): 4 894-4 898.

[23] 李林, 张大顺. 不同方法萃取的燕麦油脂肪酸组成及清除 DP-PH 自由基活性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 146-149.