

正山小种精油大孔树脂吸附工艺优化及其抗氧化活性分析

A study on the preparation of essential oil of Lapsang Souchong with macroporous resins and its antioxidant activity

何理琴^{1,2} 王彩楠^{1,2} 刘志彬^{1,2}

HE Li-qin^{1,2} WANG Cai-nan^{1,2} LIU Zhi-bin^{1,2}

张晨^{1,2} 张雯^{1,2} 倪莉^{1,2}

ZHANG Chen^{1,2} ZHANG Wen^{1,2} NI Li^{1,2}

(1. 福州大学食品科学技术研究所, 福建 福州 350108;

2. 福建省食品生物技术创新工程技术研究中心, 福建 福州 350108)

(1. Institute of Food Science and Technology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Center of Excellence for Food Biotechnology, Fuzhou, Fujian 350108, China)

摘要:通过大孔树脂吸附法制备正山小种精油,优化制备工艺,并对其挥发性香气成分和抗氧化活性进行分析。试验结果表明,最佳的精油制备工艺为:以 LX-8 大孔树脂作为吸附树脂,按 1:350(树脂湿重:香气水,g/mL)比例在恒温摇床振荡器(25℃,转速 200 r/min)吸附正山小种香气水的香气成分,吸附时间为 180 min,然后使用 95%乙醇,按 1:5(树脂湿重:乙醇,g/mL)比例在恒温摇床振荡器(25℃,转速 200 r/min)中对大孔树脂进行解吸附,解吸附时间为 150 min。该条件下获得最高浓度的正山小种精油,产品具备典型的正山小种的香气特征,其香气成分浓度是香气水的约 35 倍,回收率约 51%。气相色谱—质谱联用(GC-MS)分析吸附过程各阶段香气水的成分发现,正山小种的特征香气成分可以被 LX-8 大孔树脂吸附。该精油具有一定的抗氧化活性,其 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除活力分别为 4 μg/mL 抗坏血酸当量与 3 μg/mL 抗坏血酸当量。

关键词:正山小种精油;大孔树脂吸附法;香气成分;抗氧化活性

Abstract: In the present study, the Lapsang Souchong essential oil was prepared by using macroporous resin, during which the preparation process was optimized. Furthermore, the volatile aromatic components and antioxidant activity of the product were analyzed. The results showed that the optimal process was using LX-8 macroporous resin as the adsorption resin, and the aromatic components were absorbed in a constant temperature shaker (25℃, 200 r/min) for 180 min. The ratio of resin wet weight and substrate was 1:350 (g/mL). Subsequently, macroporous resin was desorbed by using 95% ethanol in a constant temperature shaker (25℃, 200 r/min) for 150 min. The ratio of resin wet weight to ethanol solution was 1:5 (g/mL). Under the control of this condition, the highest concentration of Lapsang Souchong essential oil was obtained. The aromatic components were concentrated 35 times, with the recovery rate approximate 51%. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis indicated that most of the characteristic aroma components of Lapsang Souchong were adsorbed by LX-8 macroporous resin. Furthermore, the product was found to possess profound antioxidant activity. Its DPPH and ABTS free radical scavenging activity are 4 and 3 μg/mL ascorbic acid equivalent, respectively.

Keywords: Lapsang Souchong essential oil; macroporous resin; aromatic components; antioxidant activity

产自福建北部武夷山的正山小种是红茶的典型代表,具有浓郁的香气和丰富的滋味。目前对正山小种挥发性香气成分的研究已有多篇报道。例如,郭雯飞等^[1]运用 GC-MS 对正山小种的香气组成进行探究,结果表明长叶烯、香叶醇、反式-2-己烯醛、苯乙醛、α-萜品醇等是正山小种的主要成分。李健权^[2]采用同时蒸馏萃取法提取

基金项目:国家重点研发计划资助项目(编号:2016YFD0400801)

作者简介:何理琴,女,福州大学在读硕士研究生。

通信作者:倪莉(1972—),女,福州大学教授,博士。

E-mail: nili@fzu.edu.cn

收稿日期:2020-03-04

产自福建北部武夷山的正山小种是红茶的典型代表,具有浓郁的香气和丰富的滋味。目前对正山小种挥发性香气成分的研究已有多篇报道。例如,郭雯飞等^[1]运用 GC-MS 对正山小种的香气组成进行探究,结果表明长叶烯、香叶醇、反式-2-己烯醛、苯乙醛、α-萜品醇等是正山小种的主要成分。李健权^[2]采用同时蒸馏萃取法提取

不同产地的正山小种的香气成分,对其分析结果表明正山小种中醛类和醇类含量相差不大,其中香叶醇、3-甲基-丁醛、芳樟醇、2-甲基-丁醛、己醛以及水杨酸甲酯含量较高,是正山小种特征性香气成分。廉明等^[3]对中国4种名优红茶挥发性成分进行分析,研究显示植醇、香叶醇、 β -紫罗酮、二氢猕猴桃内酯、咖啡因和芳樟醇氧化物是正山小种的主要成分。以正山小种茶叶,或其加工下脚料为原料,浓缩富集这些正山小种的香气成分,将其制备成香气精油产品可扩大其使用范围,提高其使用效率及经济附加值,具备一定的市场潜力,但正山小种精油的开发目前还未见报道。

研究拟以正山小种作为原料,使用蒸馏法制备正山小种香气水,然后通过大孔树脂吸附其香气成分,之后使用乙醇进行解吸附,制备正山小种精油,最后使用GC-MS分析其挥发性香气成分,并评估产品的抗氧化活性。

1 材料与设备

1.1 材料与试剂

正山小种:产地武夷山;

正构烷烃 $C_7 \sim C_{40}$:美国 O2si Smart Solutions 公司;

2-辛醇:98.0%,德国 Dr.Ehrensorfer 公司;

二苯代苦味酰基自由基(DPPH)和 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS):上海源叶生物科技有限公司;

其他试剂:分析纯。

1.2 仪器与设备

集热式磁力搅拌器:DF-1 型,金坛市鑫诺实验仪器厂;

紫外可见分光光度计:UV-2000 型,日本 HITACHI 公司;

气相色谱仪:7890B 型,美国安捷伦公司;

质谱仪:5977A 型,美国安捷伦公司;

电子天平:BL150 型,德国赛多利斯公司;

固相微萃取萃取头:50/30 μm DVB/CAR/PDMS 型,美国 Supelco 公司。

1.3 方法

1.3.1 正山小种香气水的制备和大孔树脂的预处理 取 100 g 的正山小种茶叶,浸没于 1 000 mL 沸水(95 $^{\circ}\text{C}$) 2 min,然后用两层纱布过滤去除茶叶渣得到正山小种茶汤。茶汤冷却至室温后在 55 $^{\circ}\text{C}$ 水浴上进行减压蒸馏(压力 5 kPa),收集冷凝液(约 600 mL),作为正山小种香气水,进一步使用大孔树脂吸附其香气成分。

经前期试验探索发现 LX-8 大孔树脂对正山小种香气成分具有较强的吸附及解吸附能力,因此选取 LX-8 大孔树脂用以制备正山小种香精。取 150 mg LX-8 大孔树脂置于烧杯中,加入 300 mL 95%乙醇浸泡 24 h 使

树脂充分溶胀。将充分溶胀的树脂材料装填于玻璃柱,并用 2 倍柱体积的乙醇(95%)清洗。然后用 5%盐酸溶液浸泡 6 h,再用蒸馏水清洗直至流出液 pH 呈中性,之后用 5%氢氧化钠溶液浸泡 6 h,再用蒸馏水清洗直至流出液 pH 呈中性。最后去除预处理好的大孔树脂材料备用。

1.3.2 正山小种精油的制备和香气成分含量的测定 使用大孔树脂静态吸附法制备正山小种香精。称取一定量经预处理好的树脂材料放入锥形瓶中,再分别加入一定体积上述制备好的香气水溶液,密封瓶口,置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 转速为 200 r/min 的恒温摇床振荡器中,振荡吸附一定时间,收集吸附液。

使用吸光值法粗略测定样品的香气成分含量。在波长 200~380 nm 范围内扫描样品的吸光值,并计算其积分,用以代表溶液中挥发性香气成分的浓度,并按式(1)和式(2)分别计算树脂的吸附率和吸附量。

$$A = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$Q = \frac{(S_0 - S_1) \times V}{M}, \quad (2)$$

式中:

A——吸附率,%;

S_0 ——原液吸光值积分;

S_1 ——吸附液吸光值积分;

Q——树脂吸附量,mL/g;

V——香气水体积,mL;

M——树脂干重,g。

1.3.3 正山小种挥发性香气成分的分析 使用顶空固相微萃取(HS-SPME)结合 GC-MS 技术分析正山小种精油各个制备阶段的样品^[4]。样品的前处理和分析方法:量取 5.9 mL 样品于 15 mL 样品瓶中,加入 2 g NaCl 和 100 μL 2-辛醇(内标浓度 0.062 5 mL/L),并将萃取头插入到样品瓶的顶空部分,立即置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中平衡 10 min,之后推出纤维头进行顶空吸附,萃取时间为 40 min。之后使用 GC-MS 分析样品。色谱条件:色谱柱 HP-5MS 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 μm $\times$ 0.25 mm);升温程序:起始温度 50 $^{\circ}\text{C}$,保持 6 min,以 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 90 $^{\circ}\text{C}$,再以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 180 $^{\circ}\text{C}$;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;分流进样,分流比 20:1;溶剂延迟时间 3 min;载气是 He(99.999%)。质谱条件:离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$;四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$;扫描模式:全扫描;质量扫描范围 m/z 30~550。挥发性物质的鉴定结果以 NIST11 谱库检索和保留指数共同鉴定^[5]。

1.3.4 正山小种精油 ABTS 自由基清除率的测定 配制 7 mmol/L 的 ABTS 贮存母液及 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液,临用前以 1:1 的体积比混合,室温避光放置 16 h

后,用 5 mmol/L pH 7.4 磷酸盐缓冲液稀释至于 734 nm 处吸光值为 0.70 ± 0.02 ,即 ABTS 自由基溶液。ABTS 自由基溶液与不同浓度的样品以 1:1 (体积比)混合,室温避光反应 10 min 后,于 734 nm 下测定吸光值,磷酸盐缓冲液(5 mmol/L, pH 7.4)调零。空白组用 95%酒精代替样品。按式(3)计算 ABTS 自由基清除率^[6]。

$$SR_{ABTS} = \frac{A-B}{A} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

SR_{ABTS} ——ABTS 自由基清除率, %;

A——空白组吸光值;

B——样品组吸光值。

1.3.5 正山小种精油 DPPH 自由基清除率的测定 分别取 1.5 mL 不同浓度样品溶液与 1.5 mL DPPH 溶液(0.02 mmol/L, 95%乙醇配制)充分混匀,室温避光反应 30 min 于 517 nm 处测定其吸光值;样品参比组为 1.5 mL 不同浓度的香精溶液与 1.5 mL 95%乙醇溶液;空白组为 1.5 mL DPPH 溶液与 1.5 mL 95%乙醇溶液。按式(4)计算 DPPH 自由基清除率^[6]。

$$SR_{DPPH} = \left(1 - \frac{A-B}{C}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

SR_{DPPH} ——DPPH 自由基清除率, %;

A——样品组吸光值;

B——样品参比组吸光值;

C——空白组吸光值。

1.3.6 数据分析 试验数据采用平均值±标准差表示,并使用 SPSS 22.0 统计分析软件中的 Duncan's ANOVA ($P < 0.05$)对试验数据进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 大孔树脂吸附法制备正山小种精油工艺优化

使用蒸馏法制备正山小种香气水后,利用大孔树脂吸附正山小种香气成分,并通过乙醇洗脱制备正山小种精油。前期试验对比了 12 种大孔树脂 (HPD722、DM-130、AB-8、D101、HZ816、LSA-40、DM301、HPD750、LSA-8、LX-8、HPD100、HPD950)对正山小种香气水的吸附量和解吸附量,发现 LX-8 大孔树脂对正山小种香气成分具有较强的吸附及解析附能力,因此选取 LX-8 大孔树脂用以制备正山小种香精。进一步对 LX-8 大孔树脂的使用量,吸附时间以及乙醇洗脱时间进行优化。大孔树脂对正山小种香气成分吸附和解吸附的效果使用吸光值法进行粗略判断,试验结果如下。

2.1.1 LX-8 大孔树脂使用量的优化 对比不同 LX-8 大孔树脂的使用量在恒温摇床振荡器 (25 °C, 转速 200 r/min)中吸附 3 h 对 350 mL 正山小种香气水的吸附效果,试验结果如图 1 所示。

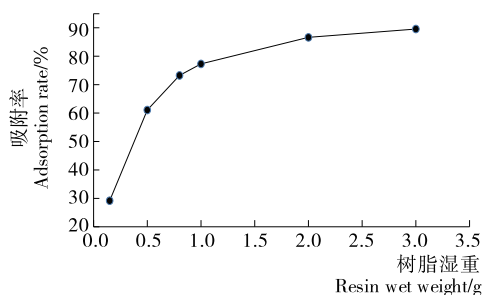


图 1 LX-8 大孔树脂不同使用量对香气成分吸附率的影响

Figure 1 The aroma compound adsorption rate of different addition amounts of macroporous resin LX-8

由图 1 可知:大孔树脂对香气成分的吸附率随树脂使用量的增加而逐渐升高,在树脂含量提高到 1.0 g 以后吸附量趋于平缓。综合考虑大孔树脂的使用量和香气成分的吸附率,选取 1.0 g LX-8 大孔树脂处理 350 mL 正山小种香气水。该使用量下,大孔树脂对正山小种香气成分的吸附率为 77.3%。

2.1.2 LX-8 大孔树脂吸附时间的优化 取 1.0 g LX-8 大孔树脂在恒温摇床振荡器 (25 °C, 转速 200 r/min)中对 350 mL 正山小种香气水进行吸附,对比不同吸附时间下大孔树脂对香气成分的吸附量,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知:LX-8 大孔树脂对香气成分的吸附量随吸附时间的增加而增加,吸附 150 min 前,LX-8 大孔树脂吸附量迅速增加,之后趋缓。吸附 180 min 后基本达到吸附平衡,综合考虑大孔树脂对香气成分的吸附量,选取 180 min 作为 LX-8 大孔树脂的最佳吸附时间。

2.1.3 LX-8 大孔树脂正山小种香气解吸附时间与次数的优化 将 1.0 g 充分吸附后的大孔树脂通过抽滤法去除吸附液,并用蒸馏水洗涤 3 次,然后加入 5 mL 95%乙醇在恒温摇床振荡器 (25 °C, 转速 200 r/min)震荡对香气成分进行解吸附,对比不同解吸附时间对正山小种香气成分的解吸附效果,结果见图 3。

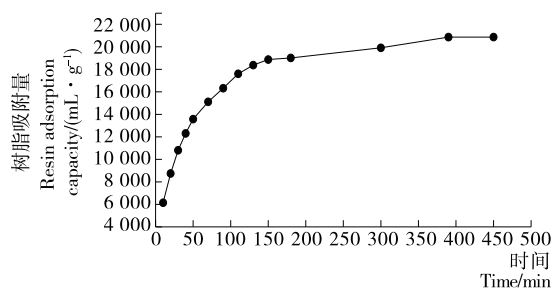


图 2 LX-8 大孔树脂不同吸附时间对香气成分吸附量的影响

Figure 2 The aroma compound adsorption amount of different adsorption time of macroporous resin LX-8

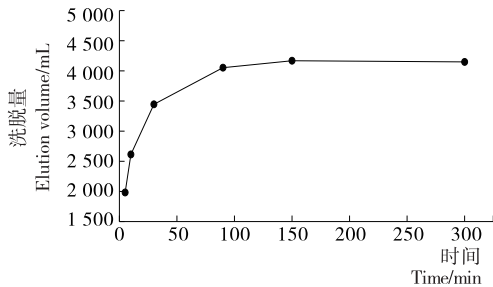


图3 不同解吸附时间对香气成分解吸附效果的影响
Figure 3 The aroma compound desorption effect of different desorption time

由图3可知:当解吸附时间为150 min时获得最高香气成分浓度的正山小种香精,提高吸附时间无法进一步获得更高浓度的香精产品。因此选取150 min作为LX-8大孔树脂的最佳解吸附时间。解吸附条件为:1.0 g LX-8已吸附香气成分的大孔树脂使用5 mL 95%乙醇在恒温摇床振荡器(25 ℃,转速200 r/min)震荡解吸附150 min。该解吸附条件下获得的正山小种香精香气成分浓度是香气水香气成分浓度的约35倍,香气成分的回收率约51%。

2.2 GC-MS分析正山小种精油的组成成分

由于正山小种精油中乙醇是最主要的成分,在使用GC-MS直接分析正山小种精油样品过程中,乙醇的峰掩盖了大量其他挥发性香气成分,无法获得有意义的数

因此使用GC-MS对正山小种茶汤、正山小种香气水及大孔树脂吸附后的残留吸附液的挥发性香气成分进行定性及定量分析,从而间接分析正山小种精油的香气成分。

由表1可知,在正山小种茶汤、香气水及大孔树脂残留吸附液中分别检测出52、43和11种挥发性香气成分,其总含量分别为 (6.862 ± 0.142) , (5.984 ± 0.080) , (0.491 ± 0.042) $\mu\text{L/L}$ 。蒸馏法所获得的正山小种香气水保留了绝大部分正山小种中的挥发性香气成分,提取率约为87.2%。大孔树脂吸附后所残留的吸附液所含有的挥发性香气成分较少,绝大部分被大孔树脂所吸附,吸附率约为91.8%。其中正山小种中的特征性香气成分基本被完全吸附,例如正山小种特征性香气成分顺式芳樟醇氧化物、芳樟醇、苯乙醇、芳樟醇氧化物、香叶醇等在残留吸附液中含量极低。因此,正山小种香气水中的特征香气成分在被充分提取之后能够被大孔树脂吸附,并制备成精油。该间接法初步说明了大孔树脂吸附法可以用于制备具有正山小种特征香气成分的精油产品。

2.3 正山小种精油抗氧化活性测定

使用95%乙醇稀释正山小种精油,采用ABTS自由基清除率和DPPH自由基清除率评估所制备正山小种精油的抗氧化性,结果如图4所示。

由图4可知:该正山小种精油的DPPH自由基和ABTS自由基清除率随精油稀释倍数的提高呈递减趋势。

表1 正山小种茶汤、香气水及其大孔树脂吸附液的挥发性香气成分

Table 1 The volatile aromatic components of black tea infusion, aromatic solution and macroporous resin adsorption solution

名称	时间/min	含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)		
		正山小种茶汤	香气水	吸附液
1-戊醇	3.739	0.011±0.000	0.009±0.000	—
顺-2-戊烯-1-醇	3.811	0.016±0.001	0.016±0.001	0.008±0.001
正己醛	4.464	0.092±0.000	0.011±0.000	0.006±0.000
2-甲基吡嗪	5.179	0.023±0.006	0.028±0.002	0.011±0.002
呋喃甲醛	5.514	0.033±0.006	0.033±0.000	—
3-甲基丁酸	5.880	0.021±0.008	—	—
反式-2-己烯醛	6.219	0.113±0.006	0.074±0.002	—
叶醇	6.367	0.092±0.008	0.089±0.006	0.018±0.001
反式-2-己烯-1-醇	6.837	0.020±0.001	0.022±0.001	—
正己醇	6.935	0.041±0.005	0.036±0.002	—
2-乙基吡嗪	9.109	0.027±0.002	0.026±0.001	—
苯甲醛	11.600	0.248±0.004	0.145±0.001	—
5-甲基呋喃醛	11.917	0.081±0.002	0.072±0.006	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮	13.477	0.049±0.007	—	—
2-辛酮	13.721	—	—	0.017±0.002
己酸	14.015	0.207±0.048	0.119±0.023	—
2-乙基-5-甲基吡嗪	14.228	—	0.019±0.000	—

续表 1

名称	时间/min	含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)		
		正山小种茶汤	香气水	吸附液
(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	14.911	0.015±0.006	0.029±0.004	—
2,2,6-三甲基环己酮	16.354	0.036±0.003	—	—
苻醇	16.526	0.253±0.010	0.152±0.000	0.021±0.002
苯乙醛	17.004	0.315±0.006	0.467±0.009	0.026±0.001
1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde, 1-ethyl	17.387	0.144±0.004	0.146±0.009	—
异佛尔酮	18.081	0.021±0.001	—	—
2-乙酰基吡咯	18.530	0.172±0.008	0.09±0.008	—
反式芳樟醇氧化物	19.062	0.453±0.021	0.53±0.006	0.077±0.012
正辛醇	19.202	0.032±0.002	—	—
2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪	19.603	0.022±0.000	0.03±0.001	—
顺式芳樟醇氧化物	20.168	1.015±0.079	1.205±0.018	0.200±0.022
正庚酸	20.379	0.016±0.002	—	—
3,5-Octadien-2-one/038284-27-4	20.595	0.011±0.001	0.017±0.010	—
芳樟醇	21.104	0.285±0.006	0.170±0.004	—
苯乙醇	21.863	0.614±0.035	0.463±0.004	0.023±0.004
乙酸苻酯	25.542	0.025±0.001	0.020±0.002	—
芳樟醇氧化物	25.778	0.129±0.005	0.077±0.003	0.013±0.001
芳樟醇氧化物	26.209	0.379±0.016	0.257±0.009	0.044±0.004
辛酸	27.006	0.048±0.004	0.030±0.006	—
alpha-松油醇	27.188	0.061±0.004	0.063±0.001	—
水杨酸甲酯	27.352	0.123±0.018	0.069±0.005	—
2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛	27.696	0.053±0.009	—	—
癸醛	28.349	0.047±0.004	0.036±0.007	0.028±0.025
β -环柠檬醛	29.032	0.028±0.002	—	—
2-茨烯	29.518	0.046±0.007	—	—
3-蒎烯	29.706	0.019±0.002	0.021±0.001	—
香叶醇	31.330	0.800±0.056	0.969±0.027	—
2-苯基巴豆醛	32.130	0.060±0.001	0.075±0.001	—
壬酸	32.677	0.031±0.004	0.030±0.005	—
Edu lan I	34.352	0.023±0.004	—	—
香叶酸	36.956	0.157±0.000	0.075±0.016	—
4-叔丁基苯丙酮	37.694	0.014±0.002	—	—
大马士酮	37.829	0.022±0.004	—	—
茉莉酮	38.502	—	0.017±0.001	—
香叶基丙酮	40.999	—	—	—
酞酸二甲酯	41.016	0.020±0.001	0.021±0.005	—
β -紫罗酮	42.358	0.091±0.008	0.114±0.005	—
可卡醛	42.537	—	0.015±0.001	—
二氢猕猴桃内酯	44.008	0.143±0.006	—	—
酞酸二乙酯	46.832	0.065±0.000	0.063±0.005	—
柏木脑	46.937	—	0.032±0.008	—
总含量		6.862±0.142	5.984±0.080	0.491±0.042

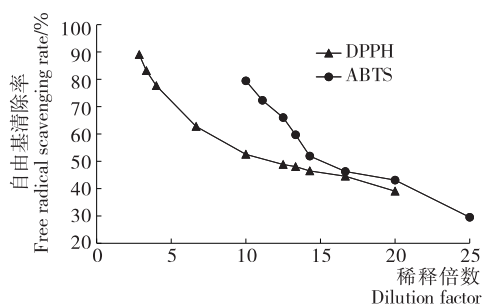


图4 正山小种精油的抗氧化活性

Figure 4 The antioxidant activity of Lapsang Souchong essential oil

稀释 20 倍后,该正山小种精油的 DPPH 自由基清除率为 39.1%;稀释 25 倍后,正山小种精油的 ABTS 自由基清除率仍有 29.5%。对比抗坏血酸的 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除率可知,该正山小种精油的 DPPH 自由基清除活力为 4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 抗坏血酸当量;ABTS 自由基清除活力为 3 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 抗坏血酸当量。

茶叶中的抗氧化成分主要认为是多酚类物质^[7-9],试验结果表明,正山小种的挥发性香气成分也具有一定的抗氧化活性,是一种潜在的天然抗氧化剂。Yu 等^[10]探究了 6 种不同来源的老鹰茶挥发油的抗氧化活性,结果表明这些挥发油均有一定的抗氧化和抗菌特性;田光辉等^[11]研究发现新鲜茶叶挥发油和加工后新茶的挥发油对 OH 自由基均有清除作用,而新鲜茶叶挥发油对 OH 自由基有较强的清除作用;Yanagimoto 等^[12]探究了绿茶、乌龙茶、红茶挥发性成分的抗氧化活性,发现绿茶挥发性成分的抗氧化活性最好。

3 结论

试验以正山小种为原料,通过大孔树脂吸附法制备了正山小种精油,优化了制备工艺。以该优化工艺所制备的正山小种精油具备典型的正山小种的香气特征,香气成分的浓缩倍数为 35,回收率约为 51%,并且具备一定的抗氧化活性。但该方法的整体香气回收率还有待提高;或者也可通过开发以正山小种加工下脚料为原料制备精油的方法,以降低精油的生产成本。

参考文献

- [1] 郭雯飞, 吕毅, 江元勋. 正山小种和烟小种红茶的香气组成[J]. 中国茶叶加工, 2005(4): 18-22.
- [2] 李健权. 不同产地红茶香气成分的测定及分析[J]. 湖南农业科学, 2017(8): 85-92.
- [3] 廉明, 吕世懂, 吴远双, 等. 我国 4 种红茶的挥发性成分分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2015(3): 301-309.
- [4] 何理琴, 王彩楠, 倪莉, 等. 正山小种挥发性香气组成及其在多次沸水浸提下的释放规律研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2018(5): 23.

- [5] LV Shi-dong, WU Yuan-shuang, SONG Yu-zhu, et al. Multivariate analysis based on GC-MS fingerprint and volatile composition for the quality evaluation of pu-erh green tea[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(2): 321-333.
- [6] 郭虹雯, 赵惠茹, 倪莉, 等. 武夷岩茶多酚组分及其抗氧化活性[J]. 中国食品学报, 2018(12): 319-325.
- [7] 李丹, 曹永, 王华, 等. 茶叶提取物体外抗氧化活性与其功能成分含量的相关性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 163-168.
- [8] 谢虹, 罗志聪, 李熙灿. 茶黄素抗氧化化学机制研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 23-26.
- [9] 王学渊, 刘静宜, 洪艳平, 等. 不同类型江西名茶儿茶素含量及体外抗氧化能力比较[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 152-158.
- [10] YU Bao, ZHANG Dan, YAN Xue-wei, et al. Comparative evaluation of the chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of the volatile oils of hawk tea from six botanical origins[J]. Chemistry and Biodiversity, 2016, 13(11): 1 573-1 583.
- [11] 田光辉, 刘存芳, 赖普辉, 等. 茶叶挥发性成分及其生物活性的研究[J]. 食品科技, 2007(12): 78-82.
- [12] YANAGIMOTO K, OCHI H, LEEK G, et al. Antioxidative activities of volatile extracts from green tea, oolong tea, and black tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(25): 7 396-7 401.

(上接第 169 页)

- [12] 许女, 贾瑞娟, 陈旭峰, 等. 鸡腿菇子实体多糖的体内、体外抗氧化活性[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 40-46.
- [13] 高行恩, 王洪新. 不同提取方法对山药多糖含量及其体外抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(7): 256-262.
- [14] 葛智超, 李燕, 施文正, 等. 裸藻多糖提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 186-191.
- [15] 景永帅, 张丹参, 张瑞娟, 等. 提取方法对北沙参多糖性质及生物活性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 149-153.
- [16] 黄玉龙, 高清雅, 全婷, 等. 不同提取方法对兰州百合多糖结构及抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(11): 126-131, 94.
- [17] 黄依佳, 吴剑荣, 朱莉, 等. 蓝藻多糖的分离、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 176-180.
- [18] ZHU Yang, LI Qian. Optimization of enzyme-assisted extraction and characterization of polysaccharides from *Herici-umerinaceus*[J]. Carbohydr Polym, 2014, 101(1): 606-613.
- [19] 张鹏, 张静. 碱提虎奶菇菌核多糖的分离纯化及结构分析[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 105-108.