

电感耦合等离子体发射光谱测定植物精油中的重金属元素

李爱阳¹, 符 靓^{2*}, 陈 林³

1. 湖南工学院材料与化学工程学院, 湖南 衡阳 421002
2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045
3. 湖南省中医药研究院中药研究所, 湖南 长沙 410013

摘 要 植物精油是从芳香植物提取的天然复杂化合物, 作为芳香植物的次生代谢产物具有挥发性和浓郁香味, 其特有的多样化生物活性广泛应用于医药和化妆品行业。植物精油具有高渗透性, 能以活跃的分子态渗透皮肤组织, 经淋巴腺吸收后进入血液, 其所含的重金属元素也极易随植物精油进入人体对健康构成潜在威胁。采用硝酸-双氧水对植物精油进行微波消解, 在多模式样品导入系统(MSIS)的双重模式下, 采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)测定其中可形成蒸气重金属元素 As, Sn, Sb, Hg 和不可形成蒸气重金属元素 Cr, Ni, Cd 和 Pb 的含量。选择盐酸对样品进行酸化并预还原氧化态元素, 通过在线加入 L-半胱氨酸/酒石酸提高可形成蒸气元素的蒸气发生效率, 利用硼氢化钠/氢氧化钠在 MSIS 中将 As, Sn, Sb 和 Hg 转变为蒸气状态; 针对分析过程中存在的多个或单个光谱重叠和背景干扰, 分别对空白溶液、分析元素和预期干扰元素的纯溶液进行测定, 根据获得的光谱响应数据解卷积构建快速自动曲线拟合技术(FACT)模型, 将分析谱线从干扰谱线中分离出来, 从而实现光谱重叠干扰和背景干扰的实时校正; 采用加标回收并与电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)进行对比分析评价方法的准确性。各元素方法的检出限(MDL)为 0.38~11.2 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 加标回收率为 95.4%~104%, 相对标准偏差(RSD)为 1.9%~4.9%, 对比分析的相对误差(RE)在 -2.1%~2.7% 之间, 表明方法准确可靠, 精密度高。对 8 种植物精油中的重金属元素进行了分析, 所有植物精油样品中重金属元素 As, Hg 和 Pb 的含量远低于 GB/T 26516—2011 制定的限量标准, 植物精油中重金属元素 Cr, Ni, Sn, Cd 和 Sb 的含量虽然没有制定限量标准, 但均处于极低水平。MSIS 兼具传统雾化和蒸气发生双重功能, 在分析可形成蒸气元素和不可形成蒸气元素时无需切换不同进样系统, 能满足大批量植物精油中微量重金属元素的高通量分析需要。

关键词 植物精油; 电感耦合等离子体发射光谱; 重金属; 多模式样品导入系统; 快速自动曲线拟合技术
中图分类号: O657.31 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1162-06

引 言

植物精油是从芳香植物的叶、芽、果实、花、嫩枝、根和种子中提取的脂溶性天然复杂化合物, 作为芳香植物的次生代谢产物具有挥发性和浓郁香味。精油的主要成分由萜烯类化合物以及酚类、醇类、醚类、醛类和酮类组成^[1], 其含量因植物部位和植物种类的不同而存在差异, 这些混合物在产生香味的同时具有生物活性, 广泛用于防腐、食品保存以及作为抗菌、镇痛、镇静、抗炎和局部麻醉药物, 且比相应的

合成药物具有更低的副作用^[2]。植物精油的品质主要取决于其有机成分, 但所含无机成分同样影响植物精油的品质和安全性, 尤其是植物精油具有高渗透性, 能以活跃的分子态渗透皮肤组织, 经淋巴腺吸收后进入血液^[3], 其所含的重金属元素也极易随植物精油进入人体对健康构成威胁, 我国国家标准 GB/T 26516—2011 对精油中重金属元素含量制定了 Pb $\leq 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As $\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Hg $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的标准。因此, 对植物精油中重金属元素含量进行准确测定非常必要。

植物精油中的重金属元素主要来源于芳香植物的自然生

收稿日期: 2021-03-22, 修订日期: 2021-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(81603400), 湖南省自然科学基金项目(2019JJ60026), 湖南省教育厅重点项目(20A140), 湖南省应用特色学科材料科学与工程学科项目(湘教通[2018]469号), 湖南省工程研究中心项目(湘发改委高技[2019]853号)资助

作者简介: 李爱阳, 女, 1969年生, 湖南工学院材料与化学工程学院教授 e-mail: layllp@163.com

* 通讯作者 e-mail: fuliang@vip.163.com

长环境、精油的生产加工以及工业“三废”的污染，植物精油提取方法主要采用蒸馏萃取工艺^[4]，因此，植物精油中重金属元素含量通常很低。电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)由于具有低检出限、多元素检测能力、高样品通量和低样品消耗等优点，是植物精油中多种痕量元素测定的技术选择^[5-7]，我国质量监督检验检疫总局制定了 ICP-MS 测定精油中多种重金属元素的行业标准(SN/T 2484—2010)。然而，ICP-MS 对于高盐样品的耐受力差，分析维护费用高，常规四极杆 ICP-MS(ICP-QMS)无法彻底消除质谱干扰的强烈影响，即使是带碰撞反应池(CRC)技术的 ICP-MS 也难以消除一些特殊干扰(如同质异位素、双电荷离子、二聚体等)，需采用价格昂贵的电感耦合等离子体串联质谱(ICP-MS/MS)或扇形磁场 ICP-MS(SF-ICP-MS)才能彻底消除^[8-10]。电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-OES)具有超高基质耐受能力，高灵敏度和分析效率，配合准确的光谱干扰校正技术，可用于复杂样品中多元素的快速分析^[11]。对于重金属元素 As, Sn, Sb 和 Hg 的测定，由于这些元素具有较高的第一电离能，采用传统的液体雾化进样，ICP-OES 的检测限偏高，通常使用蒸气发生装置将这些元素转变为挥发性蒸气，从而更加有效地运输、雾化和激发，提高这些元素的检出能力^[12]，但需使用额外的蒸气发生装置，与不可形成蒸气元素同时测定时需要切换进样系统，操作复杂烦琐，不利于样品中多元素的高通量分析。多模式进样系统(MSIS)既可作为蒸气发生装置又可作为传统雾化室，能同时对可形成蒸气和不可形成蒸气元素进行测定。研究中利用硝酸-双氧水对植物精油进行微波消解，在 MSIS 的双重模式下，采用 ICP-OES 对植物精油中可形成蒸气元素 As, Sn, Sb, Hg 和不可形成蒸气元素 Cr, Ni, Cd, Pb 的含量进行测定，通过构建自动曲线拟合技术(FACT)模型校正光谱干扰，以期提高 ICP-OES 的高通量检测能力。

1 实验部分

1.1 仪器及参数

ICP-OES 仪，5110，Agilent 公司；微波消解仪，MARs 5，CEM 公司；ICP-MS，NexION 350，Perkinelmer 公司。

ICP-OES 工作参数：RF 功率，1.4 kW；等离子体流速，12 L·min⁻¹；辅助所流速，1.1 L·min⁻¹；雾化气流速 0.65 L·min⁻¹；泵速，25 r·min⁻¹；读取时间，20 s；重复次数，3 次；样品提升延迟时间，35 s；稳定时间，30 s；冲洗时间，55 s；背景与干扰校正，FACT。

1.2 试剂

1 000 mg·L⁻¹的 Cr, Ni, As, Cd, Sn, Sb, Hg 和 Pb 单元素储备溶液，国家标准物质中心；氢氧化钠(分析纯)、硼氢化钠(分析纯)、L-半胱氨酸(生物纯)、酒石酸(分析纯)，国药集团化学试剂有限公司；65%(W/W)硝酸、30%(W/W)双氧水、37%(W/W)盐酸，德国 Merck 公司；8 种植物精油样品(薄荷精油、柠檬精油、玫瑰精油、薰衣草精油、茉莉精油、丁香精油、迷迭香精油、花椒精油)购买于大型超市。

1.3 样品处理

称取约 0.4 g 植物精油样品于微波消解反应罐中，依次加入 2.5 mL 硝酸和 1.0 mL 双氧水，敞开罐盖预消解 30 min，密封反应罐，按表 1 设定程序进行消解。消解结束后，采用沸水浴将消解溶液赶酸，用 15%(V/V)的盐酸转移至 50 mL 容量瓶中定容，至少静置 30 min 后测定。采用相同步骤制备空白溶液。

表 1 微波消解操作参数

Table 1 Operation parameters of microwave digestion

Step	Power /W	Ramp time/min	Temperature /°C	Hold temperature/°C
1	1 600	5	120	/
2	1 600	3	150	5
3	160	5	180	15

1.4 方法

应用 ICP-OES 的 MSIS 进行测定，采用五通道蠕动泵开启 MSIS 的双重模式(见图 1)。样品溶液分别从通道 B 和通道 C 进入 MSIS 雾化室。来自通道 B 的样品在 MSIS 中进行传统雾化后，由氩气带入等离子体中分析不可形成蒸气元素 Cr, Ni, Cd 和 Pb，来自通道 C 的样品进入 MSIS 前与来自通道 E 的预还原溶液(2% L-半胱氨酸/4% 酒石酸)经三通接头混合，进入 MSIS 雾化室后与来自通道 A 的还原剂(1.5% 硼氢化钠/0.5% 氢氧化钠)反应，形成蒸气由氩气带入等离子体中分析可形成蒸气元素 As, Sn, Sb 和 Hg，雾化室产生的废液经通道 D 排出。

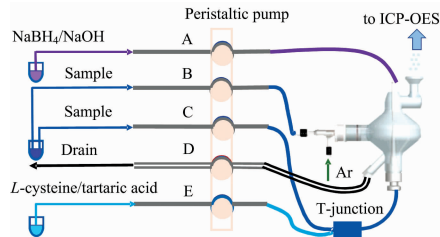


图 1 用于双重模式的多模式样品导入系统(MSIS)

Fig. 1 Multimode sample introduction system (MSIS) setup for dual mode

2 结果与讨论

2.1 蒸气发生条件的优化

植物精油样品中的 As, Sn, Sb, Hg 通常以高氧化态 As(V), Sn(IV), Sb(V), Hg(II) 稳定存在，其中，As, Sn 和 Sb 气态氢化物的形成强烈依赖于元素的氧化态，较低的氧化态更容易转化为氢化物，因此，在分析之前有必在将 As(V), Sn(IV), Sb(V) 还原为低价态 As(III), Sn(II), Sb(III)。盐酸具有还原性，是蒸气发生常用的预还原剂，能将 As(V), Sn(IV), Sb(V) 还原为低价态 As(III), Sn(II), Sb(III)，Hg(II) 还原为基态原子，本实验选择盐酸作预还原剂。固定硼氢化钠的浓度为 1.5%，考察了不同盐酸浓度下 As, Sn, Sb 和 Hg 信号强度的变化情况。从图 2(a)可以看

出,随着盐酸浓度的增大,As,Sn和Sb的信号强度也逐渐增大,Hg的信号强度则保持平稳,当盐酸浓度达到15%后,As的信号强度逐渐减小,Sn和Sb的信号强度继续增大,但增幅趋于平缓,Hg的信号强度基本不变,表明盐酸浓度的变化不影响Hg的测定,选择盐酸浓度为15%。为防止盐酸在MSIS中由于酸碱反应被逐渐消耗导致信号强度下降,实验通过在线加入2%L-半胱氨酸/4%酒石酸补偿可形成蒸气元素的信号损失,提高蒸气发生效率,稳定分析信号强度。

固定盐酸浓度为15%,选择硼氢化钠作为还原剂为蒸气发生反应提供氢源,考察了不同硼氢化钠浓度下,As,Sn,Sb和Hg信号强度的变化情况。从图2(b)可以看出,随着硼氢化钠浓度的增大,As,Sn,Sb和Hg的信号强度也逐渐增大,当硼氢化钠浓度分别为1.5%,1.2%,1.5%和1.0%时,As,Sn,Sb和Hg的信号强度分别达到最大,随后As,Sn和Sb的信号强度逐渐下降,而Hg的信号强度小幅度下降,考虑到Hg的信号强度大于As,Sn和Sb,即使硼氢化钠的浓度达到1.5%时,Hg的信号强度仍然在1700左右。因此,实验选择硼氢化钠的浓度为1.5%,并加入0.5%的氢氧化钠稳定硼氢化钠溶液。

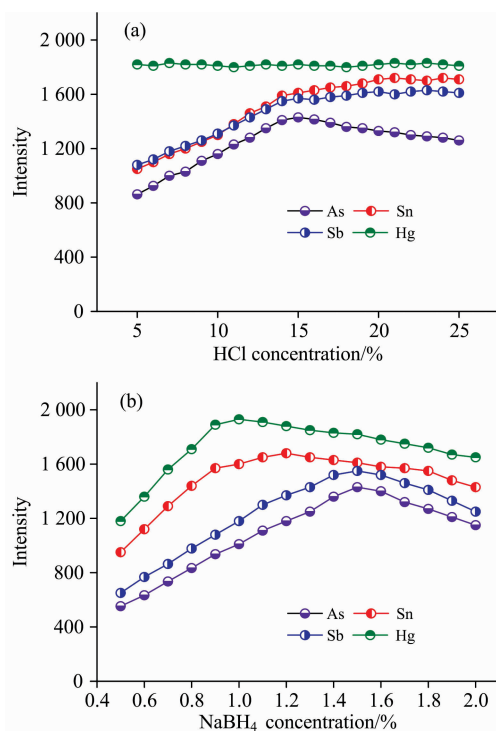


图2 盐酸(a)和硼氢化钠(b)浓度对As,Sn,Sb,Hg信号强度的影响

Fig. 2 Influence of HCl (a) and NaBH₄ (b) concentrations on signal intensity of As, Sn, Sb, and Hg

2.2 光谱干扰及校正

利用ICP Expert软件的波长数据库,根据光谱强度和潜在光谱重叠干扰选择最佳波长通常可以避免光谱干扰,然而,当高灵敏谱线存在光谱干扰而无干扰谱线提供的灵敏度不足以满足分析要求时,所选择的高灵敏谱线面临的光谱重

叠干扰必需进行校正,以提高分析结果的准确性。Cd的发射光谱在214.439和226.502 nm处有两条高强度谱线,但均存在Fe光谱重叠干扰,Cd在226.502 nm受到来自Fe在226.459和226.505 nm处谱线的干扰,Cd在214.439 nm受到Fe在214.445 nm处的谱线干扰,实验选择灵敏度高且干扰相对较小的Cd 214.439 nm为分析波长,但面临着Fe 214.445 nm的重叠干扰。FACT以解卷积方式能从原始光谱响应数据中解析出分析谱线,通过数据建模技术实时校正光谱干扰^[13]。本实验分别对空白溶液、100 μg·L⁻¹的Cd标准溶液、10 000 mg·L⁻¹的干扰元素Fe标准溶液进行测定,利用FACT对获得的所有光谱响应数据进行建模。从图3可以看出,高浓度Fe对低浓度Cd产生了严重谱线重叠干扰,通过FACT建模可以很好地将Cd的光谱线从Fe的干扰线中解析出来,校正了Fe光谱对Cd的重叠干扰。Pb的干扰与Cd相似,Pb的最灵敏离子线220.353 nm受到来自Fe在220.352 nm处存在的谱线重叠干扰,实验采用FACT进行校正。在FACT建模过程中包含的空白溶液响应数据还能同时校正背景干扰,基于所有分析元素均存在背景干扰,实验对所有元素的测定均采用FACT校正光谱干扰。

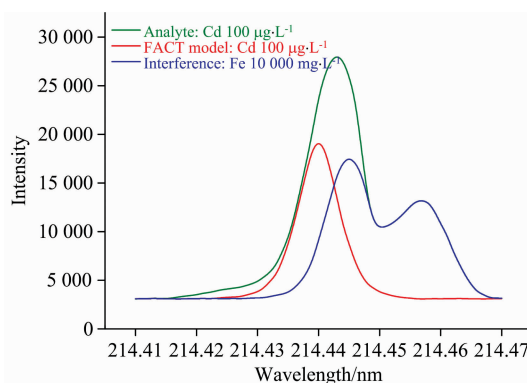


图3 采用FACT校正Cd 214.439 nm的光谱干扰
Fig. 3 Spectral interferences for Cd 214.439 nm corrected using FACT

2.3 方法分析性能评价

配制浓度分别为0.0, 5.0, 20, 100和200 μg·L⁻¹的系列混合元素工作标准溶液,采用标准曲线法对植物精油中的重金属元素进行定量分析,按实验方法建立分析元素的标准曲线。对空白溶液重复测定11次,以测定结果3倍标准偏差所对应浓度乘以样品的稀释倍数,计算分析元素方法的检出限(MDL),结果见表2。8个分析元素的线性相关系数大于0.9997,均具有良好的线性,MDL为0.38~11.2 μg·kg⁻¹,低于标准(SN/T 2484—2010)ICP-MS方法所得到的测定低限。

由于缺少精油标准参考物质,为评价本法的准确性,采用ICP-MS法与本法对同一薄荷精油进行对比分析,计算二者的相对误差(RE),并对测定结果进行加标回收,结果见表3。两种方法分析结果基本一致,RE在-2.1%~2.7%之间;本法的加标回收率为95.4%~104%,相对标准偏差(RSD)为1.9%~4.9%。验证了本法的准确性好,精密度高。

表 2 分析元素的线性和方法的检出限 (MDL)

Table 2 The linearity and the method detection limit (MDL) of the analyte

Element	Wavelength/nm	linearity range/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	Dependent coefficient/r	MDL/ $(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
Cr	267.716	0.22~200	1.000 0	8.25
Ni	231.604	0.12~200	0.999 9	4.50
As	188.980	0.15~200	0.999 8	5.62
Cd	214.439	0.07~200	0.999 9	2.63
Sn	189.925	0.05~200	1.000 0	1.88
Sb	206.834	0.17~200	0.999 8	6.38
Hg	194.164	0.01~200	0.999 9	0.38
Pb	220.353	0.31~200	0.999 9	11.2

表 3 分析方法的准确性和精密度 ($n=6$)Table 3 Accuracy and precision of analytical method ($n=6$)

Element	This method					Found by ICP-MS $/(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	RE /%
	Found $/(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	RSD /%	Spiked $/(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	Total found $/(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	Recovery /%		
Cr	61.3±3.01	4.9	50.0	109±3.38	95.4	62.2±1.87	-2.1
Ni	30.2±0.66	2.2	50.0	82.3±2.07	104	30.7±0.45	-1.6
As	48.9±2.10	4.3	50.0	99.2±2.13	101	47.6±1.53	2.7
Cd	40.3±1.32	3.3	50.0	91.6±1.45	103	39.5±1.20	2.0
Sn	16.0±0.55	3.4	50.0	65.3±1.67	98.6	16.3±0.48	-1.8
Sb	21.5±0.53	2.5	50.0	72.7±2.80	102	21.2±0.86	1.4
Hg	10.8±0.20	1.9	50.0	58.9±1.36	96.2	10.6±0.35	1.9
Pb	76.2±2.85	3.7	50.0	125±3.04	97.6	74.9±2.02	1.7

2.4 实际样品分析

对薄荷精油、柠檬精油、玫瑰精油、薰衣草精油、茉莉精油、丁香精油、迷迭香精油、花椒精油共 8 种植物精油样品进行了重金属元素分析, 每个样品重复测定 6 次, 分析结果见表 4。8 种植物精油中重金属元素的含量随种类不同存在很大差异, Cr 的含量在花椒精油中最高, 在玫瑰精油和茉莉精油中没检出; Ni 的含量在薰衣草精油中最高, 在玫瑰精油、茉莉精油、丁香精油和迷迭香精油中没检出; As 的含量在柠檬精油中含量最高, 在薰衣草精油、茉莉精油和迷迭香精油中没检出; Cd 的含量在玫瑰精油中最高, 在薰衣草精油

和迷迭香精油中没检出; Sn 的含量在茉莉精油中最高, 在柠檬精油、薰衣草精油、丁香精油、迷迭香精油和花椒精油中没检出; Sb 的含量在茉莉精油中最高, 在丁香精油中的含量最低; Hg 在迷迭香精油中的含量最高, 在玫瑰精油和薰衣草精油中没检出; Pb 的含量在花椒精油中最高, 在迷迭香精油中的含量最低。所有植物精油样品中重金属元素 As, Hg 和 Pb 的含量均远低于 GB/T 26516—2011 制定的最高限量标准, 植物精油中重金属元素 Cr, Ni, Cd, Sn 和 Sb 的含量虽然没有制定限量标准, 但均处于极低水平。

表 4 植物精油样品分析结果 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n=6$)Table 4 Analysis results of plant essential oil samples ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n=6$)

Plant essential oil	Cr	Ni	As	Cd	Sn	Sb	Hg	Pb
<i>Mentha canadensis</i> Linnaeus	61.3±3.01	30.2±0.66	48.9±2.10	40.3±1.32	16.0±0.55	21.5±0.53	10.8±0.20	76.2±2.85
<i>Citrus limon</i> (L.) Burm. f.	87.5±2.64	14.6±0.31	116±3.28	21.5±0.53	ND	38.6±1.20	6.21±0.33	50.9±1.70
<i>Rosa rugosa</i> Thunb.	ND	ND	71.5±1.80	73.6±2.19	10.1±0.20	30.4±0.92	ND	96.0±2.13
<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	69.0±2.18	32.0±0.68	ND	ND	ND	17.3±0.51	ND	41.2±1.55
<i>Jasminum sambac</i> (L.) Aiton	ND	ND	ND	26.4±0.97	18.3±0.26	51.0±1.38	4.58±0.17	38.7±1.61
<i>Syringa oblata</i> Lindl.	53.2±1.41	ND	37.8±1.59	30.5±1.10	ND	12.2±0.37	11.5±0.31	44.1±0.82
<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	47.0±2.36	ND	ND	ND	ND	26.3±0.64	15.2±0.40	30.5±1.34
<i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim.	128±3.72	25.2±0.59	41.5±3.02	28.2±0.93	ND	14.9±0.87	7.97±0.25	103±2.86

Note: "ND": no detected

3 结 论

针对同时测定可形成蒸气和不可形成蒸气元素需采用不同的进样系统,本研究将 MSIS 与 ICP-OES 相结合,确定了在 MSIS 的双重模式下同时对样品进行传统雾化和蒸气发生

反应,建立了植物精油中可形成蒸气重金属元素 As, Sn, Sb, Hg 和不可形成蒸气重金属元素 Cr, Ni, Cd, Pb 的快速检测方法。与标准 SN/T 2484—2010 规定的 ICP-MS 法相比较,方法的最大优势是分析效率高,检测限低,更适合大批量植物精油样品中重金属元素的高通量检测分析。

References

- [1] de Souas Barros A, de Morais S M, Ferreira P A T, et al. *Ind. Crop. Prod.*, 2015, 76: 557.
- [2] Stefanakis M K, Touloupakis E, Anastasopoulos, et al. *Food Control*, 2013, 34: 539.
- [3] Herman A, Herman A P. *J. Pharm. Pharmacol.*, 2015, 67(4): 473.
- [4] Yousefi M, Rahimi-Nasabadi M, Pourmortazavi, et al. *TrAC-Trend Anal. Chem.*, 2019, 118: 182.
- [5] Fu L, Xie H L, Shi S Y. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2018, 410: 3769.
- [6] Miron C, Sanchez R, Prats S, et al. *Anal. Chim. Acta*, 2020, 1094: 34.
- [7] FU Liang, SHI Shu-yun(符 靓, 施树云). *Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学)*, 2017, 45(8): 1222.
- [8] Kuznetsova O V, Timerbaev A R. *At. Spectrosc.*, 2021, 42(2): 85.
- [9] LI Tan-ping, LI Ai-yang(李坦平, 李爱阳). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2021, 41(2): 618.
- [10] ZHAO Zhi-fei, REN Xiao-rong, LI Ce, et al(赵志飞, 任小荣, 李 策, 等). *Rock and Mineral Analysis(岩矿测试)*, 2021, 40(1): 95.
- [11] Ma Y, Liu P, Hu X, et al. *At. Spectrosc.*, 2020, 41(2): 81.
- [12] Tanabe C K, Hopfer H, Gilleland G, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2016, 31(6): 1223.
- [13] Santos L D S, Bley H, Selau L P R, et al. *Commun. Soil Sci. Plan.*, 2019, 50(14): 1671.

Determination of Trace Heavy Metal Elements in Plant Essential Oils by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

LI Ai-yang¹, FU Liang^{2*}, CHEN Lin³

1. College of Material and Chemical Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China

2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

3. Institute of Chinese Materia Medica, Hunan Academy of Traditional Chinese Medicine, Changsha 410013, China

Abstract Plant essential oils are naturally complex compounds extracted from aromatic plants with volatile and tangy aromas as secondary metabolites of aromatic plants, and their diverse biological activities are widely used in the pharmaceutical and cosmetic industries. Plant essential oils are highly permeable and can penetrate skin tissue in an active molecular state and enter the bloodstream after absorption via the lymph glands. The heavy metal elements they contain are also highly susceptible to the entry of plant essential oils into the human body, posing a potential threat to health. This paper used nitric acid and hydrogen peroxide for microwave digestion of plant essential oils. In the dual-mode of multimode sample introduction system (MSIS), the contents of vapor forming heavy metal elements As, Sn, Sb, and Hg and non-vapor forming heavy metal elements Cr, Ni, Cd, and Pb were determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Hydrochloric acid was selected to acidify the sample and reduce the oxidized analytes in the sample. L-cysteine/tartaric acid was added online to improve the vapor generation efficiency. Sodium borohydride/sodium hydroxide was selected to transform As, Sn, Sb, and Hg into the vapor state in MSIS. Because of the multiple or single spectral overlap and background interference in the analysis process, the pure solutions for the blank, analyte and the expected interferences are measured in the sample, and the fast automatic curve fitting technology (FACT) was constructed according to the obtained spectral response data by deconvolution. Analytical spectral lines were separated from interference spectral lines to realize real-time correction of spectral overlap interference and background interference. The method's accuracy was evaluated by the spike recovery experiments and comparison with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The method detection limit (MDL) of analyte was between 0.38~11.2 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the spiked recovery was 95.4%~104%, the relative standard deviation (RSD) was 1.9%~4.9%, and the relative error (RE) of the comparative analysis ranged from -2.1% to 2.7%, indicating that the method was accurate and reliable with high

precision. The heavy metal elements in eight plant essential oils were analyzed, and the levels of As, Hg, and Pb in all plant essential oil samples were well below the maximum limit standards established by GB/T 26516—2011, while the levels of Cr, Ni, Sn, Cd, and Sb, the heavy metal elements in plant essential oils, although no limit standards were established, were at extremely low levels. MSIS has the dual functions of traditional atomization and vapor generation. It does not need to switch different sampling systems when analyzing vapor forming elements and non-vapor forming elements. It can meet the needs of high-throughput analysis of trace heavy metal elements in large quantities of plant essential oils.

Keywords Plant essential oil; Inductively coupled plasma optical emission spectrometry; Heavy metal; Multimode sample introduction system; Fast automatic curve fitting technology

(Received Mar. 22, 2021; accepted May 16, 2021)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约，自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters 旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

- ScholarOne Manuscripts, 该系统不仅能轻松处理稿件, 而且能提速科技交流。
- 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台, 全球拥有超过 1 350 万的注册用户, 代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。
- ScholarOne Manuscripts 与 EndNote, Web of Science 无缝链接和整合; 使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。
- ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门, 拥有丰富的学术期刊业务经验, 为学术期刊提供综合管理 workflow 系统, 使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程, 提高作者心中的专业形象, 缩短论文发表时间, 削减管理成本, 帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”, 势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时, 会带来某些不便, 在此深表歉意! 为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程, 以实现与国际先进出版系统对接; 为了不断提高期刊质量, 加快网络化、数字化建设, 加快与国际接轨的进程, 希望能得到广大作者、读者们的支持与理解, 对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物, 肯定有不周全、不完善的地方, 让我们共同努力, 不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日