DOI:10.12441/spyswjs.20250530001 [文章编号] 1673-1689(2025)09-0067-10

基于QuEChERS-气相色谱-质谱法快速检测滇红茶中香茅醇和香叶醇

刁玉华 万 静* 马艳红 陈 娴 赵云龙

(昆明市食品药品检验所,云南 昆明 650032)

摘要:【目的】针对滇红茶中可能非法添加玫瑰香精(香茅醇、香叶醇)的问题,建立了QuEChERS-气相色谱-质谱法(QuEChERS-GC-MS),用于快速检测香茅醇和香叶醇。**【方法】**滇红茶样品用水浸润后再经乙腈提取,提取液用QuEChERS分散固相进行萃取净化,在选择离子监测(SIM)模式下检测,并通过外标法定量。**【结果】**香茅醇、香叶醇在质量浓度为0.05~5.00 μg/mL时线性关系良好,相关系数(R^2)均大于0.999;加标水平为0.5、1.0、5.0、10.0 mg/kg时,回收率为95.7%~106.4%,相对标准偏差(RSD)为0.77%~6.58%,方法的检出限(LOD)分别为0.22、0.10 mg/kg,定量限(LOQ)分别为0.74、0.32 mg/kg。对29批可疑的滇红茶样品进行分析检测,结果表明,所有可疑样品中均检出较高质量分数的香茅醇和香叶醇,最高质量分数分别为53.40、68.33 mg/kg,滇红茶中可能存在非法添加香精的情况。**【结论】**该方法简单易操作,重复性和精密度良好,适用于滇红茶中香茅醇和香叶醇的快速检测。

关键词: QuEChERS-气相色谱-质谱法;滇红茶;非法添加;香茅醇;香叶醇

Quick Detection of Citronellol and Geraniol in Yunnan Black Tea by QuEChERS-GC-MS

DIAO Yuhua WAN Jing MA Yanhong CHEN Xian ZHAO Yunlong*

(Kunming Institute for Food and Drug Control, Kunming 650032, China)

Abstract: [**Objective**] In view of the possible illegal addition of rose flavors (citronellol and geraniol) to Yunnan black tea, a method was established for rapid detection of citronellol and geraniol based on QuEChERS-gas chromatography-mass spectrometry (QuEChERS-GC-MS). [**Method**] The procedure involved extracting Yunnan black tea samples with acetonitrile following water wetting. The extract was purified by QuEChERS dispersed solid phase extraction. It was detected under the selected ion monitoring (SIM) mode and quantified by the external standard method. [**Result**] Good linear relationships were observed for citronellol and geraniol within the mass concentration range from 0.05 to 5.00 μg/mL, with correlation coefficients (R^2) greater than 0.999 for both compounds. The recovery rates under the spiked concentrations of 0.5, 1.0, 5.0, and 10.0 mg/kg fell within the range of 95.7% to 106.4%, with relative standard deviations (RSD) ranging from 0.77% to 6.58%. The method exhibited the limits of detection (LOD) of 0.22 mg/kg and 0.10 mg/kg and the limits of quantification (LOQ) of 0.74 mg/kg and 0.32 mg/kg. The method was then employed to analyze 29 suspected Yunnan black tea samples. The results showed high mass fractions of citronellol and geraniol in suspected samples, with the highest mass fractions recorded at 53.40 mg/kg and 68.33 mg/kg, respectively, which indicated illegal addition of flavors in Yunnan black tea. [**Conclusion**] It is a straightforward, reproducible, and precise method suitable for the rapid detection of citronellol and geraniol in Yunnan black tea.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32472434)。

通信作者:万静(1993—),女,本科,工程师,主要从事食品质量安全检测分析研究。E-mail:1980490569@qq.com

收稿日期:2025-05-30 **修回日期:**2025-08-13

Keywords: QuEChERS-gas chromatography-mass spectrometry; Yunnan black tea; illegal addition; citronellol; geraniol

滇红茶是云南茶区所产红茶的统称，在国内外市场具有较高的认可度[1-3]，其特殊的发酵工艺形成了茶叶丰富多样的香气，而香气是评价茶叶品质的一个重要指标[4-5]。目前红茶中检测出的挥发性香气物质已超过700种[6-7]，其中，芳樟醇、香叶醇、己醛、水杨酸甲酯、苯乙醇等是红茶中的主要挥发性香气物质[8-11]。近年来，一些不法商家在茶叶中非法添加香精[12-13]，以次充好，严重损害消费者的权益，甚至威胁消费者的健康，破坏市场秩序和行业信誉。

香叶醇和香茅醇均为单萜烯类化合物，具有典型的玫瑰花香[14-15]，是玫瑰系花香香精的主要成分[16-18]。在茶叶中非法添加玫瑰香精以冒充自然发酵的滇红茶，仅从感官上难以区分。GB 2760—2024中明确规定了茶叶中不得添加香精，但未有相应的食品安全检测标准；且以往研究中多将香叶醇作为茶叶自身香气物质，未将其作为非法添加香精的特征检测指标。王玉娇等[19]建立了茶叶中香豆素、侧柏酮、2-己基噻吩、反式-*β*-金合欢烯等禁用香精的检测方法，梁志森等[20]建立了茶叶中茴香烯、香豆素、胡椒酚甲醚、指甲花醌、甲基丁香酚、蒲勒酮、反式肉桂醛等可能非法添加香精的检测方法，陈玉珍等[21]建立了茶叶中1,8-桉叶素、胡椒酚甲醚、茴香烯、甲基丁香酚、反式肉桂醛、香豆素、樟脑、反式-甲基异丁香酚、顺式-甲基异丁香油酚等香精的检测方法，而针对香茅醇和香叶醇的检测鲜见报道。因此，非法添加玫瑰香精的鉴别与检测很有必要。

香精主要由挥发性物质组成，检测方法有气相色谱法(GC)[22-23]、气相色谱-质谱法(GC-MS)[19,24-25]、液相色谱-质谱法(LC-MS)[20]和电子鼻法[26]等。其中，电子鼻易受环境因素影响，专属性和稳定性较差[27]；而香精大多是小分子化合物，且沸点低，更适合采用GC-MS检测。作者通过建立QuEChERS前处理技术结合GC-MS的分析方法，快速检测滇红茶中的香茅醇和香叶醇质量分数，以鉴别茶叶中是否非法添加玫瑰香精。该研究旨在为监管部门评判茶叶中非法添加香精的食品安全问题提供技术支持，为检验检测机构开展香精检测提供技术参考，同时对滇红茶产业的科学监管与健康发展具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香茅醇(纯度97.1%)、香叶醇(纯度97.5%)：坛墨质检科技股份有限公司；无水硫酸镁、氯化钠：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；乙腈：色谱纯，美国赛默飞世尔科技有限公司；*N*-丙基乙二胺(PSA)、十八烷基键合硅胶(C18)、石墨化炭黑(GCB)、QuEChERS提取盐包(7.5 g，含6.0 g无水硫酸镁、1.5 g醋酸钠)：美国安捷伦科技有限公司。

1.2 仪器与设备

气相色谱-质谱仪：7890B-7000D型，美国安捷伦科技有限公司；电子天平：XSR204型，瑞士梅特勒-托利多公司；旋涡混合器：Multi Reax型，德国海道尔夫公司；高速离心机：Sorvall ST16型，美国赛默飞世尔科技有限公司；超纯水仪：Milli-Q型，美国密理博公司。

1.3 方法

1.3.1 试样前处理

1)提取：准确称取1.00 g粉碎均匀的茶叶样品于50 mL塑料离心管中，加5 mL水浸润，涡旋振荡5 min，静置30 min后加入10 mL乙腈，摇匀并超声提取5 min，再向离心管中加入3 g氯化钠，剧烈振荡混匀2 min，5 000 r/min离心5 min，待净化。

2)净化：定量吸取2 mL上清液于15 mL离心管中，加入200 mg无水硫酸镁、100 mg PSA、100 mg C18、30 mg GCB，涡旋振荡5 min，5 000 r/min离心5 min，经0.22 μm有机相滤膜过滤后，上机检测。

1.3.2 仪器条件

1)气相色谱条件：色谱柱为DB-WAX石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)，进样口温度240 ℃，载气(高纯He)流量1.0 mL/min，进样方式为分流进样，分流体积比5∶1，进样量1.0 μL。升温程序：初始温度60 ℃，保持1 min，以30 ℃/min升至140 ℃，再以8 ℃/min升至220 ℃，保持2 min。

2)质谱条件：电子轰击电离(EI)，电离能量70 eV，离子源温度230 ℃，传输线温度240 ℃，四

极杆温度150 ℃，溶剂延迟4 min，扫描模式SIM，每种化合物分别选择1个定量离子和3个定性离子。香茅醇定量离子为69，定性离子为41、81、95；香叶醇定量离子为69，定性离子为41、93、123。

1.3.3　标准溶液配制

1）标准储备溶液（10.00 mg/mL）配制：分别称取适量香茅醇、香叶醇标准物质，加入乙腈使其溶解并稀释至10 mL，混匀后得到质量浓度为10.00 mg/mL的标准储备溶液，4 ℃条件下避光保存。

2）混合标准中间溶液（10.00 μg/mL）配制：吸取0.1 mL标准储备溶液于100 mL的容量瓶中，用乙腈定容，混匀后得到质量浓度为10.00 μg/mL的混合标准中间溶液，4 ℃条件下避光保存。

3）标准工作溶液配制：吸取适量混合标准中间溶液，用乙腈稀释，得到质量浓度分别为0.05、0.10、0.20、0.50、1.00、2.00、5.00 μg/mL的标准工作溶液。

1.4　基质效应评价

在质谱分析中普遍存在基质效应，香茅醇、香叶醇在滇红茶中的基质效应按式（1）计算。

$$M_E=(1-S_S/S_m)\times 100\% \quad (1)$$

式中：

M_E——基质效应，%；

S_S——基质匹配标准曲线斜率；

S_m——纯溶剂标准曲线斜率。

当−50%<M_E<50%时，为弱基质效应；当M_E≤−50%或M_E≥50%时，为强基质效应[16]。

1.5　回收率、RSD、LOD和LOQ测定

采用滇红茶空白样品进行0.5、1.0、5.0、10.0 mg/kg的加标回收试验，计算回收率和RSD，同一加标水平进行6次重复测定。在滇红茶空白样品中添加低质量分数的目标组分，当信噪比≥3时，确定为LOD；当信噪比≥10时，确定为LOQ。

1.6　滇红茶样品中目标组分的测定

采用所建立的方法测定37批滇红茶样品中目标组分。

1.7　数据处理

采用SPSS 27.0软件对数据进行单因素方差分析和显著性分析，采用Excel软件计算回收率、精密度，采用Excel、Origin 2021软件绘图。条件优化试验均重复3次。

2　结果与讨论

2.1　仪器条件优化

2.1.1　初始温度选择

初始温度对目标组分的分析很重要，温度过高会使组分峰型展宽，过低会影响分析效率。试验中对比了不同初始温度（40、50、60、70、80 ℃）下目标组分的峰面积，结果见表1。随着初始温度的升高，香茅醇、香叶醇的峰面积逐渐减小，且当初始温度为60 ℃时，基线比40、50 ℃时更加平稳。为保证良好的分析测试结果及分析效率，选择60 ℃作为初始温度。

表1　不同初始温度下目标组分的峰面积

Table 1　Peak areas of target compounds at different initial temperatures

初始温度/℃	香茅醇峰面积	香叶醇峰面积
40	101 578	193 783
50	99 585	187 369
60	90 308	179 119
70	82 981	168 769
80	77 207	159 325

2.1.2　进样方式和分流体积比选择

对不同进样方式和不同分流体积比进行比较，结果见图1。当进样方式采用不分流模式时，香叶醇、香茅醇的色谱峰峰型较宽；采用分流模式时，峰型较尖锐对称，因此采用分流模式进行分析。同时，考察了不同分流体积比（5∶1、10∶1、20∶1）对目标组分色谱峰峰型的影响。分流体积比越大，进入色谱柱的目标组分就越少，当分流体积比为10∶1和20∶1时，对低质量浓度（0.05 μg/mL）的目标组分灵敏度不佳；当分流体积比为5∶1时，既能保证对低质量浓度目标组分具备较好的检测灵敏度，又能使高质量浓度目标组分呈现尖锐且对称的色谱峰。因此，选择分流体积比为5∶1。

2.1.3　扫描模式选择

SIM模式和多反应监测（multiple reaction monitoring，MRM）模式是质谱分析中常用的扫描模式，比较了2种扫描模式对香茅醇、香叶醇的影响，发现2种扫描模式对香叶醇的影响较大，结果见图2。虽然MRM模式色谱图更加干净，基线噪音小，但香叶醇的离子对（123和81、93和77）相对强度比值较小，不超过10%；而在SIM模式下，香叶醇的各离子

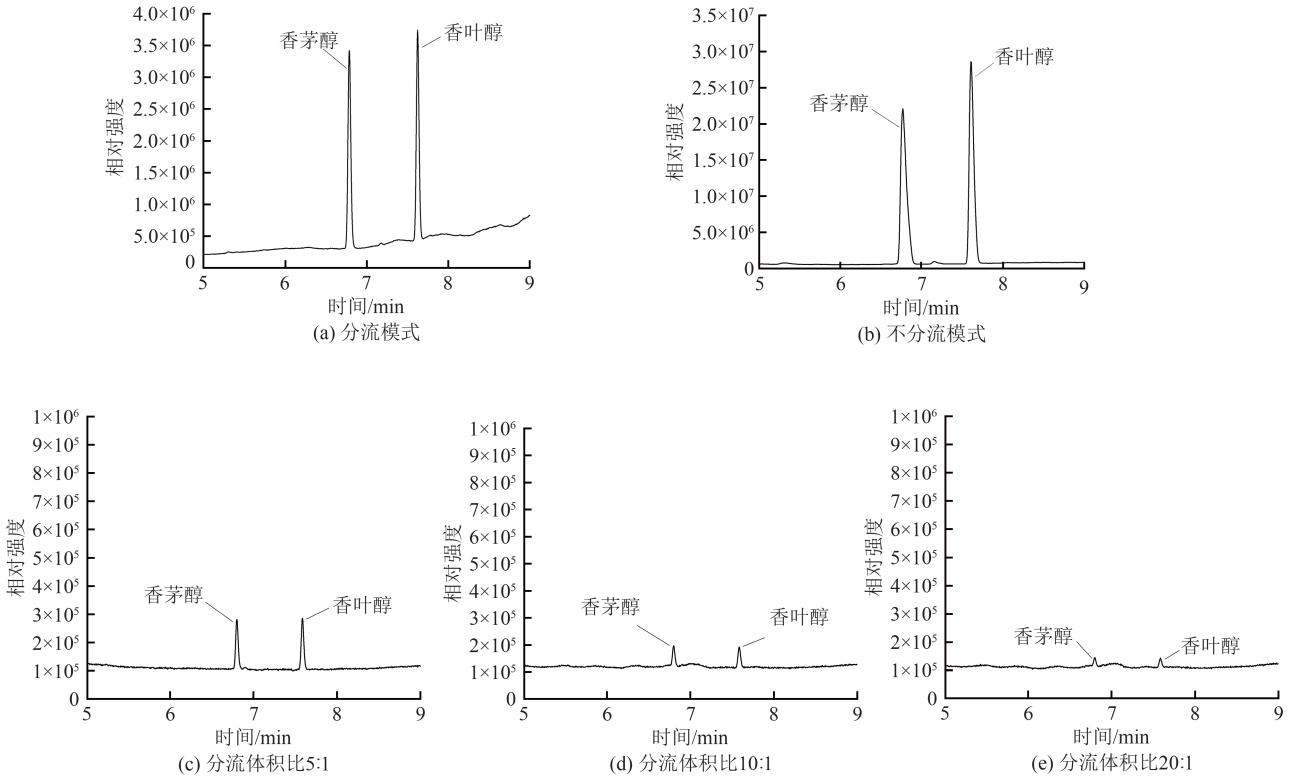


图 1　不同进样方式、不同分流体积比下目标组分色谱比较

Fig. 1　Comparison of chromatograms of target compounds between different injection methods and among different split volume ratios

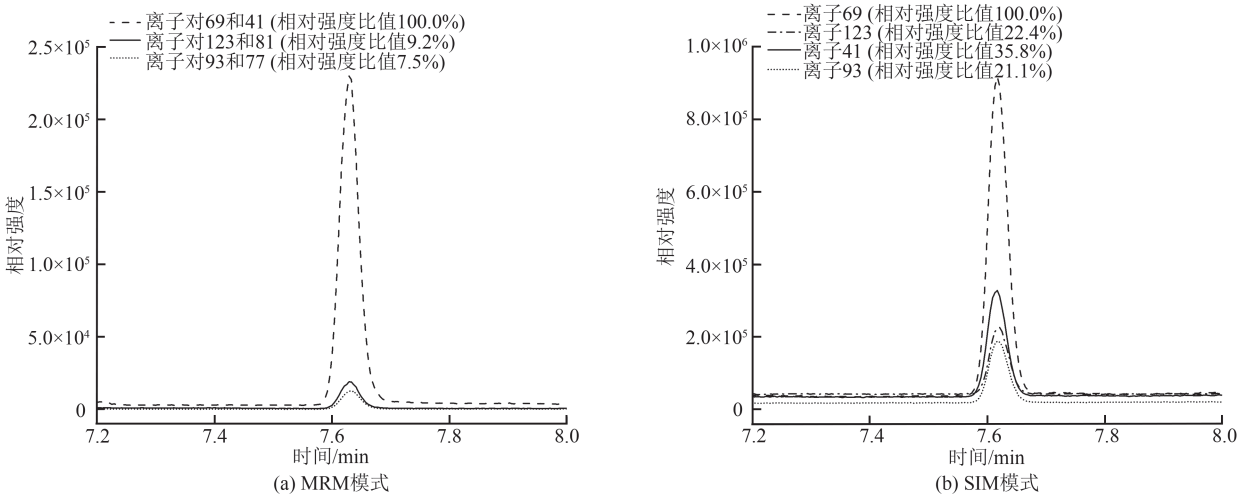


图 2　MRM 模式和 SIM 模式对香叶醇的影响

Fig. 2　Effects of MRM mode and SIM mode on geraniol

相对强度比值在20%以上。因此，为能更加准确地对目标组分进行定性与定量分析，选择SIM模式。

2.2　前处理条件优化

2.2.1　浸润处理及提取溶剂选择

茶叶含水量较低，在加提取溶剂前对比了浸润处理对目标组分回收率的影响。同时，在目标组分添加水平为5.0 mg/kg的条件下，考察了5种有机溶剂（乙腈、正己烷、乙醚、丙酮、甲醇）对目标组分的提取效率，结果见表2。茶叶经浸润处理后，对目标组分的提取效果更好，浸润处理添加的水量参照GB 23200.113—2018。2种目标组分在乙腈、乙醚、丙酮中的回收率均较高。同时，由图3可以看

出，乙醚、丙酮会提取出更多的共萃物，污染仪器，增加了仪器维护成本。因此，选择乙腈作为提取溶剂。

表2　不同浸润处理和不同提取溶剂对目标组分回收率的影响

Table 2　Effects of different wetting treatments and different extraction solvents on the recovery rates of target compounds

处理	溶剂	香茅醇回收率/%	香叶醇回收率/%
浸润	—	17.7	18.0
	水	90.5	90.6
提取	乙腈	89.5	102.8
	正己烷	66.6	82.6
	乙醚	93.7	107.1
	丙酮	92.6	103.2
	甲醇	43.1	50.7

注：“—”表示无溶剂。

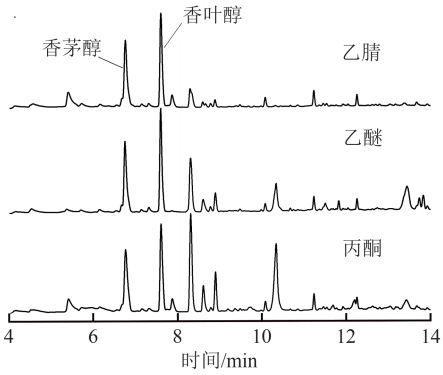


图3　乙腈、乙醚、丙酮作为提取溶剂时目标组分总离子流图

Fig. 3　Total ion chromatograms of target compounds with acetonitrile, ethyl ether, and acetone as extraction solvents

2.2.2　QuEChERS提取盐包与氯化钠盐析效果比较

乙腈与水具有较好的互溶性，而气相色谱-质谱仪不宜接触大量水分，否则会缩短仪器使用寿命。为实现乙腈和水的分离，比较了QuEChERS提取盐包与氯化钠的盐析分层效果。结果显示，两者效果差异较小，香茅醇和香叶醇的回收率均在91.5%~113.7%，虽然QuEChERS提取盐包会使分层更加明显，但无水硫酸镁遇水结块，需要加入均质子使其散开。与QuEChERS提取盐包相比，添加氯化钠的操作更加简便快速。当加入3 g氯化钠时，水溶液达到饱和状态，这使得目标组分能够最大限度地溶解于乙腈中。

2.2.3　提取方式选择

通过对比超声、振荡、超声振荡提取方式对目标组分回收率的影响，确定最佳提取方式。在提取时间为5 min时，超声提取能够实现目标组分的较高回收率，结果见表3。随着超声时间的延长，目标组分的回收率有所增加，结果见表4。但超声时间过长会导致更多干扰物溶出。当超声时间为10 min时，目标组分的回收率接近120%。因此，选择5 min作为超声时间。

表3　不同提取方式对目标组分回收率的影响

Table 3　Effects of different extraction methods on recovery rates of target compounds

提取方式	香茅醇回收率/%	香叶醇回收率/%
超声	106.6	109.1
振荡	88.3	84.5
超声振荡	117.2	119.3

表4　超声时间对目标组分回收率的影响

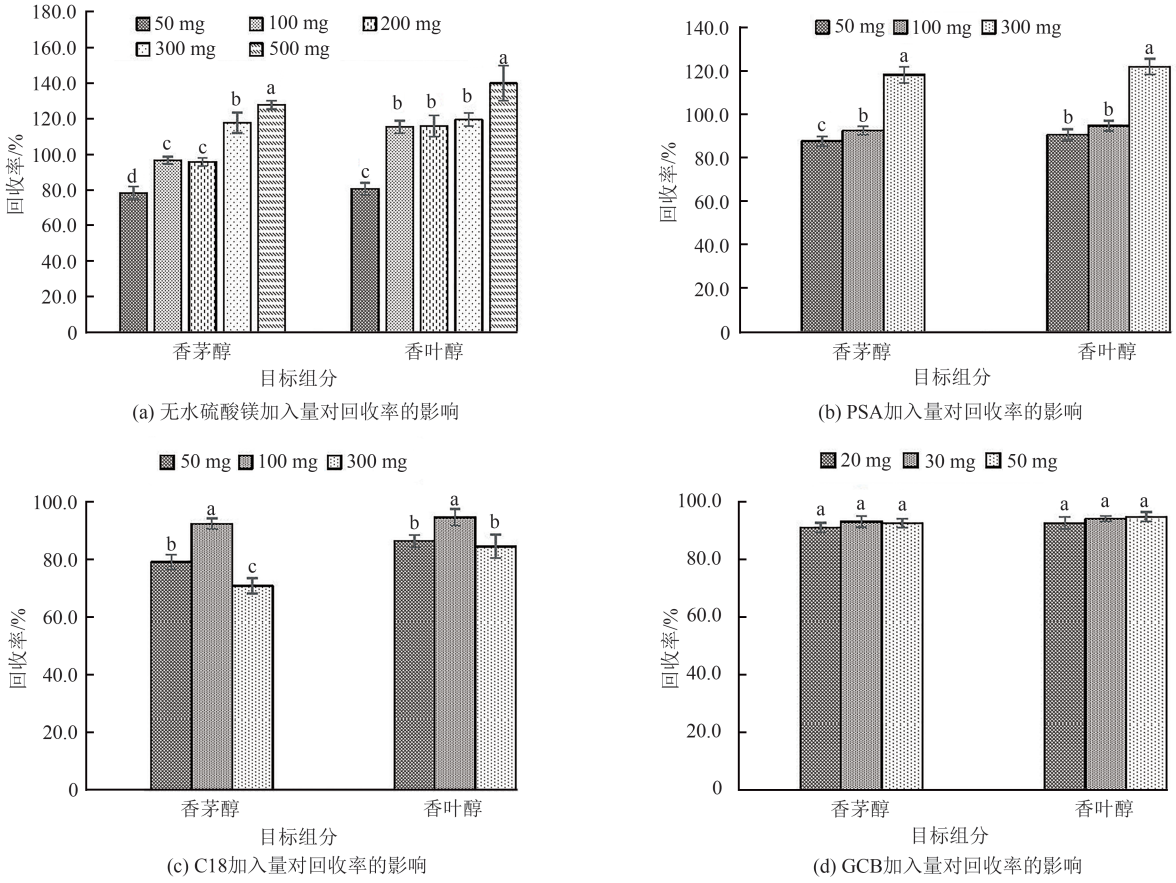
Table 4　Effects of ultrasound time on recovery rates of target compounds

超声时间/min	香茅醇回收率/%	香叶醇回收率/%
2	91.7	96.6
5	104.7	99.2
10	117.1	119.3

2.2.4　净化条件选择

PSA、C18、GCB和无水硫酸镁是QuEChERS法常用的净化材料，不同比例的组合可以净化基质中色素、脂肪、蛋白质等干扰物[28]。当滇红茶空白样品中目标组分添加水平为2.0 mg/kg时，考察4种材料对香茅醇、香叶醇回收率的影响，结果见图4。在加入100 mg PSA、50 mg C18和50 mg GCB的条件下，无水硫酸镁对目标组分的回收率差异明显，当加入量为100、200 mg时，目标组分回收率较好，但用量过多时，回收率超过120%。为能完全去除2 mL上清液中的水，选择加入200 mg的无水硫酸镁。在加入200 mg无水硫酸镁、50 mg GCB、100 mg C18的条件下，考察PSA加入量（50、100、300 mg）对目标组分回收率的影响。结果显示，目标组分的回收率差异明显，香茅醇的回收率为87.6%~118.2%，香叶醇的回收率为90.6%~121.9%，随着PSA加入量的增大，回收率也随之增加。这一现象可能是因为过量的PSA导致溶

液的pH改变，使其对干扰物的吸附不完全，最终选择PSA的加入量为100 mg。在加入200 mg无水硫酸镁、50 mg GCB、100 mg PSA的条件下，考察C18加入量（50、100、300 mg）对目标组分回收率的影响。结果显示，目标组分的回收率差异明显。当C18加入量为100 mg时，香茅醇和香叶醇的回收率均在90%以上；当C18加入量为300 mg时，目标组分的回收率较加入量为100 mg时显著降低，这可能是由于目标组分被过量的C18非特异性吸附，最终选择C18的加入量为100 mg。在加入200 mg无水硫酸镁、100 mg PSA、100 mg C18的条件下，考察GCB加入量（20、30、50 mg）对目标组分回收率的影响。结果显示，目标组分的回收率变化较小且差异不显著（P>0.05），当GCB加入量为30 mg时，滇红茶中的大部分色素已被净化干净，溶液较澄清。因此，选择200 mg无水硫酸镁、100 mg PSA、100 mg C18、30 mg GCB作为最佳净化方式。



(a) 无水硫酸镁加入量对回收率的影响

(b) PSA加入量对回收率的影响

(c) C18加入量对回收率的影响

(d) GCB加入量对回收率的影响

不同小写字母表示组内差异显著（P<0.05）。

图4 无水硫酸镁、PSA、C18、GCB加入量对目标组分回收率的影响

Fig. 4 Effects of added amounts of anhydrous magnesium sulfate, PSA, C18, and GCB on the recovery rates of target compounds

2.3 方法学验证

2.3.1 线性范围及基质效应

在GC-MS分析中，多数化合物会呈现出基质效应，对滇红茶基质中目标组分的线性范围和基质效应进行考察，结果如表5所示。各目标组分在质量浓度为0.05~5.00 μg/mL时线性关系良好，R^2在0.999以上。基质效应结果表明，在滇红茶基质中香茅醇和香叶醇呈弱基质效应。

2.3.2 回收率、RSD、LOD和LOQ

当滇红茶空白样品中目标组分添加水平为0.5、1.0、5.0、10.0 mg/kg时，按照最佳条件分析检测，回收率、RSD、LOD和LOQ结果见表6，2种目标组分回收率为95.7%~106.4%，RSD为0.77%~6.58%。在滇红茶空白样品中添加低质量分数的目标组分，香茅醇的LOD为0.22 mg/kg，LOQ为0.74 mg/kg；香叶醇的LOD为0.10 mg/kg，LOQ为0.32 mg/kg。

表5　目标组分标准曲线方程和R^2

Table 5　Standard curve equations and R^2 of target compounds

目标组分	标准曲线方程	线性范围/(μg/mL)	R^2	基质效应/%
香茅醇	y=944.437 573x+23 610.747 646*	0.05~5.00	0.999 20	6.22
	y=889.120 696x+15 061.084 145		0.999 48	
香叶醇	y=1 917.910 925x+35 208.728 485*	0.05~5.00	0.999 80	8.11
	y=1 774.001 524x+25 500.177 918		0.999 34	

注：“*”为基质匹配标准曲线方程。

表6　目标组分的回收率、RSD、LOD和LOQ

Table 6　Recovery rates, RSD, LOD, and LOQ of target compounds

目标组分	添加水平/(mg/kg)	回收率/%	RSD/%	LOD/(mg/kg)	LOQ/(mg/kg)
香茅醇	0.5	100.1	3.16	0.22	0.74
	1.0	103.4	2.21		
	5.0	100.5	2.52		
	10.0	96.3	5.83		
香叶醇	0.5	102.5	4.86	0.10	0.32
	1.0	106.4	4.02		
	5.0	102.8	0.77		
	10.0	95.7	6.58		

2.3.3　滇红茶样品检测结果

编号1~29的样品为可疑的滇红茶样品，具有浓烈的玫瑰花香气；编号30~37的样品为自购的滇红茶样品。由表7可以看出，所有可疑样品中均检出较高质量分数的香茅醇和香叶醇。李云飞等[15]采用顶空固相微萃取技术测定的茶叶中香叶醇质量分数为0.13~11.85 mg/kg。李俊等[29]对贵州红茶香气成分特征进行研究，以乙酸苯乙酯为内标，测得贵阳产区红茶中香叶醇的质量分数为2.197 mg/kg。肖春燕等[30]对福建不同产地红茶风味品质差异进行分析，以癸酸乙酯为内标，测得香

表7　滇红茶样品中目标组分质量分数

Table 7　Mass fractions of target compounds in black tea samples

编号	香茅醇质量分数/(mg/kg)	香叶醇质量分数/(mg/kg)	编号	香茅醇质量分数/(mg/kg)	香叶醇质量分数/(mg/kg)
1	38.41	49.94	20	29.60	35.47
2	43.73	56.44	21	34.15	41.19
3	14.03	18.43	22	6.55	6.94
4	46.01	61.22	23	6.53	9.16
5	35.04	44.83	24	9.01	12.14
6	53.40	68.33	25	40.24	52.27
7	6.58	9.14	26	10.66	17.43
8	24.78	29.20	27	35.34	47.58
9	21.13	25.25	28	3.68	6.38
10	23.05	27.53	29	1.56	3.86
11	27.71	34.45	30	—	0.73
12	23.08	28.66	31	—	0.02
13	42.57	51.13	32	—	0.51
14	40.08	49.04	33	—	0.37
15	34.26	41.77	34	—	1.17
16	40.33	49.25	35	—	2.83
17	29.67	35.51	36	—	0.96
18	40.10	49.63	37	—	1.27
19	31.17	37.26			

注：“—”表示未检出。

叶醇的最高质量分数为(11.39±7.25) mg/kg。尽管该方法与其他研究者的方法存在差异,但值得注意的是,常规红茶样品及研究中自购红茶样品香气成分分析中均未检出香茅醇。此外,可疑样品中香茅醇和香叶醇的质量分数均高于 20.0 mg/kg 的有 21 批,占比 72.4%,其中 6 号滇红茶样品中香茅醇、香叶醇质量分数分别达到 53.40、68.33 mg/kg,极有可能源于人为非法添加玫瑰香精。然而,也不排除这些香气成分来自特殊工艺(与玫瑰花共同发酵等)的可能性,该现象的成因有待进一步的分析研究。

3 结论

通过探究不同提取方式、不同净化材料配比,建立了 QuEChERS-GC-MS 快速检测滇红茶中香茅醇和香叶醇的分析方法。方法学验证和滇红茶实际样品的检测结果显示,该方法前处理简单快速、分析效率高、重复性好、灵敏度高。在 29 批可疑的滇红茶样品中均检出较高质量分数的香茅醇、香叶醇,反映出茶叶中可能存在非法添加香精的情况,希望能引起相关部门重视。该研究仅以香茅醇、香叶醇作为研究对象,在对低含量组分进行检测,或应对茶叶特殊工艺带来的基质干扰时,目前的方法尚无法有效辨别是否存在人为非法添加玫瑰香精的情况。因此,下一步研究将针对正常发酵滇红茶和玫瑰香精,发掘其特征性物质,以便更准确地分析茶叶中是否非法添加香精。

参考文献

[1] 刘盼盼,郑鹏程,龚自明,等. 工夫红茶品质分析与综合评价[J]. 食品科学,2021,42(12):195-205.
LIU P P, ZHENG P C, GONG Z M, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of Chinese Congou black tea[J]. Food Science, 2021, 42(12): 195-205.(in Chinese)

[2] 许咏梅,施云峰. 中国红茶出口“一带一路”沿线国家贸易及其影响因素实证分析[J]. 茶叶科学,2019,39(5):602-610.
XU Y M, SHI Y F. An empirical analysis of the trade and influencing factors of China's black tea export to countries along the Belt and Road[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(5): 602-610.(in Chinese)

[3] 雷绵森,刘学艳,杨坚. 滇红茶研究进展及展望[J]. 茶叶通讯,2023,50(2):159-165.
LEI M S, LIU X Y, YANG J. Research progress and prospect of Yunnan black tea [J]. Journal of Tea Communication, 2023, 50(2): 159-165.(in Chinese)

[4] 汤海昆,杨方慧,张艳梅,等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析不同茶树品种晒红茶的香气成分[J]. 食品工业科技,2023,44(7):260-268.
TANG H K, YANG F H, ZHANG Y M, et al. Analysis of the aroma composition of sun-dried black tea samples processed by different varieties based on HS-SPME-GC-MS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 260-268.(in Chinese)

[5] 马会杰,蒋宾,潘玉兰,等. 电子鼻对不同产地名优绿茶和红茶香气特征的判别研究[J]. 食品科技,2019,44(1):336-344.
MA H J, JIANG B, PAN Y L, et al. Identification of aroma characteristics of famous green tea and black tea from various regions by electronic nose [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(1): 336-344.(in Chinese)

[6] 彭云,李果,刘学艳,等. 不同产地红茶香气品质的 SPME/GC-MS 分析[J]. 食品工业科技,2021,42(9):237-244.
PENG Y, LI G, LIU X Y, et al. SPME/GC-MS analysis of aroma quality of black tea from different producing areas [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 237-244.(in Chinese)

[7] WANG Y J, HUANG L F, DENG G J, et al. The shaking and standing processing improve the aroma quality of summer black tea[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139772.

[8] 刘聪,张文杰,严亮,等. 顶空固相微萃取结合 GC/MS 分析玫瑰香型滇红茶香气成分[J]. 食品科技,2017,42(8):300-305.
LIU C, ZHANG W J, YAN L, et al. Analysis of volatile aroma components in rose aromatic Yunnan black tea using headspace solid-phase microextraction coupled with GC-MS [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(8): 300-305.(in Chinese)

[9] CHEN X H, CHEN D J, JIANG H, et al. Aroma characterization of Hanzhong black tea (*Camellia sinensis*) using solid phase extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and olfactometry and sensory analysis [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 130-136.

[10] 艾安涛，陈曦，李燕丽，等. 不同品种“遵义红”红茶香气成分分析[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(4)：103-111.
AI A T，CHEN X，LI Y L，et al. Analysis of aroma components in different varieties of “Zunyi Red” black tea [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(4)：103-111.(in Chinese)

[11] 李晶，林馥茗，戴浩民，等. 不同茶树品种芽型工夫红茶的品质特征[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(7)：35-46.
LI J，LIN F M，DAI H M，et al. Quality characteristics of bud-type Congou black tea from different tea cultivars[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(7)：35-46.(in Chinese)

[12] 张辉，贾敬敦，王文月，等. 国内食品添加剂研究进展及发展趋势[J]. 食品与生物技术学报，2016，35(3)：225-233.
ZHANG H，JIA J D，WANG W Y，et al. Current status and future trends of food additives research in China[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2016，35(3)：225-233.(in Chinese)

[13] 王淑贤，肖航，杨振发，等. 香精掺假普洱茶的近红外光谱检测[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(23)：392-397.
WANG S X，XIAO H，YANG Z F，et al. Detection of flavor adulterated Pu’er tea by near-infrared spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress，2020，57(23)：392-397.(in Chinese)

[14] 周汉琛，杨霁虹，刘亚芹，等. 香叶醇及其糖苷在茶树中的积累和对红茶香气的贡献[J]. 中国食品学报，2023，23(6)：339-346.
ZHOU H C，YANG J H，LIU Y Q，et al. The accumulation of geraniol and its glycoside in tea plant and the contribution to the aroma of black tea[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2023，23(6)：339-346.(in Chinese)

[15] 李云飞，杜丽平，王若宇，等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定茶叶中香叶醇[J]. 分析试验室，2015，34(3)：307-310.
LI Y F，DU L P，WANG R Y，et al. Determination of geraniol in teas by HS-SPME-GC-MS [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory，2015，34(3)：307-310.(in Chinese)

[16] 彭天花，游惠婉，孙淑婉，等. 11种香叶植物挥发物比较及玫瑰精油香气模拟研究[J]. 华中农业大学学报，2025，44(1)：74-84.
PENG T H，YOU H W，SUN S W，et al. Comparing volatile compounds in 11 plants with aromatic leaf and simulating aroma of rose essential oil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2025，44(1)：74-84.(in Chinese)

[17] 魏朝俊，王慧雯，曾晖，等. 养生醋中香茅醇和香叶醇含量分析[J]. 食品安全质量检测学报，2018，9(17)：4686-4692.
WEI C J，WANG H W，ZENG H，et al. Content determination of citroniol and geraniol in healthy vinegar [J]. Journal of Food Safety and Quality，2018，9(17)：4686-4692.(in Chinese)

[18] 朱岳麟，王文广，熊常健. 玫瑰香精油化学成分分析[J]. 北京工业大学学报，2009，35(9)：1253-1257.
ZHU Y L，WANG W G，XIONG C J. Comparison on composition of different rose essential oil[J]. Journal of Beijing University of Technology，2009，35(9)：1253-1257.(in Chinese)

[19] 王玉娇，刘通，邓亚美，等. QuEChERS-气相色谱-串联质谱法快速检测茶叶中6种禁用香精成分[J]. 色谱，2019，37(7)：766-772.
WANG Y J，LIU T，DENG Y M，et al. Rapid determination of six banned fragrance components in tea by QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Chromatography，2019，37(7)：766-772.(in Chinese)

[20] 梁志森，陈玉珍，周朗君. 超高效液相色谱-串联质谱法快速同时检测茶叶中7种香料[J]. 食品与机械，2020，36(11)：51-57.
LIANG Z S，CHEN Y Z，ZHOU L J. An UHPLC-MS/MS method for rapid analysis of tea for the potential presence of illegally added flavorings [J]. Food & Machinery，2020，36(11)：51-57.(in Chinese)

[21] 陈玉珍，梁志森，曾广丰，等. 气相色谱-四极杆/飞行时间质谱法同时测定茶叶中10种香料化合物[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(23)：9044-9050.
CHEN Y Z，LIANG Z S，ZENG G F，et al. Simultaneous determination of 10 kinds of fragrance compounds in tea by gas chromatography-high resolution quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality，2021，12(23)：9044-9050.(in Chinese)

[22] 于雷，王澍，王公辉，等. 固相萃取-气相色谱法测定油料中5种香精香料[J]. 粮食与油脂，2024，37(7)：

147-151.
YU L, WANG S, WANG G H, et al. Determination of 5 flavor and perfume in oil seeds by solid phase extraction-gas chromatography method[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(7): 147-151.(in Chinese)

[23] 郑利军，邓晓庆，陈雄，等. 气相色谱法测定国公酒中7种掺伪香精成分[J]. 中国酿造，2024，43(2)：253-257.
ZHENG L J, DENG X Q, CHEN X, et al. Determination of seven adulterated essence components in Guogong liquor by gas chromatography[J]. China Brewing, 2024, 43(2): 253-257.(in Chinese)

[24] WANG J W, HANG Y X, YAN T T, et al. Qualitative analysis of flavors and fragrances added to tea by using GC-MS[J]. Journal of Separation Science, 2018, 41(3): 648-656.

[25] 陈丹萍，朱克卫，谢应新，等. 气相色谱-质谱联用法测定葡萄酒中三种邻氨基苯甲酸酯类葡萄香精[J]. 中国酿造，2018，37(4)：183-186.
CHEN D P, ZHU K W, XIE Y X, et al. Determination of three *O*-aminobenzoic acid esters grape essence in wine by gas chromatography-mass spectrometer[J]. China Brewing, 2018, 37(4): 183-186.(in Chinese)

[26] 魏代巍，魏超昆，张惠玲. 基于灰色关联度分析肉味香精电子鼻响应值与感官评分之间的相关性[J]. 肉类研究，2022，36(5)：49-53.
WEI D W, WEI C K, ZHANG H L. Grey correlation degree for analysis of the correlation between electronic nose responses to meat flavors and their sensory scores[J]. Meat Research, 2022, 36(5): 49-53.(in Chinese)

[27] 王玉娇，邓伟，刘通，等. 食品中香料香精分析方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2019，10(2)：400-406.
WANG Y J, DENG W, LIU T, et al. Research progress of detection techniques for food flavors and fragrances [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(2): 400-406.(in Chinese)

[28] 刘文菁，戴明，何孟杭，等. QuEChERS-UPLC-MS/MS快速测定乳粉中28种真菌毒素[J]. 食品科技，2025，50(3)：338-347.
LIU W J, DAI M, HE M H, et al. Rapid determination of 28 kinds of mycotoxins in milk powder by QuEChERS-UPLC-MS/MS [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(3): 338-347.(in Chinese)

[29] 李俊，祝愿，方舒婷，等. 基于固相微萃取气质联用对贵州红茶香气成分特征的研究[J]. 食品工业科技，2021，42(13)：304-316.
LI J, ZHU Y, FANG S T, et al. Study on aroma composition characteristics of Guizhou black tea by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 304-316.(in Chinese)

[30] 肖春燕，李晶，王治会，等. 福建不同产地红茶风味品质差异分析[J]. 食品工业科技，2025，46(5)：255-266.
XIAO C Y, LI J, WANG Z H, et al. Analysis of flavor and quality differences in black tea from different geographical origins in Fujian [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 255-266.(in Chinese)

（责任编辑：许艳超）