

基于 GC-IMS 分析不同储存时间 金露梅红茶中挥发性有机物

张艳荣¹, 吴家虞¹, 景慧^{2,3}, 刘力宽^{1,3}, 左文明¹, 李锦萍^{1,3*}, 曾阳^{1,3*}

(1. 青海师范大学 生命科学学院, 青海省青藏高原药用动植物资源重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省农业技术推广总站, 青海 西宁 810008; 3. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘要: 为研究储存时间对金露梅红茶中挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)的影响, 采用气相-离子迁移色谱(gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)技术测定 2019 年、2020 年、2021 年金露梅红茶中 VOCs 组成。结果表明, GC-IMS 技术从不同时间金露梅红茶样品中鉴定出 61 个信号峰, 通过内置数据库定性出 43 种 VOCs, 包括 20 种醛类、8 种酮类、7 种醇类、2 种酯类、2 种烯类、2 种吡嗪类和 1 种呋喃类等。通过主成分分析(principal component analysis, PCA) 2019 年样品和 2020 年、2021 年样品差异较大。由指纹图谱分析发现, 随着储存时间的延长, 2021 年样品中 VOCs 的种类和浓度相对较大, 2019 年样品中 VOCs 的种类和浓度最小。通过偏最小二乘法中变量投影重要性值(variable importance for the projection, VIP)判定, 分析出金露梅红茶中 14 种潜在特征性 VOCs, 结合聚类热图结果发现, 金露梅红茶随着储存时间的延长, 乙醇、苯甲醛(M)、2-甲基丁醛(D)、二甲基三硫、NF-12 等含量逐渐升高, 而 3-羟基丁酮、己醛、丙酮、反式-2-戊烯醛、壬醛(M)、2-己烯醛(M)、NF-3、NF-4、NF-18 等含量逐渐降低。
关键词: 金露梅; 红茶; 储存时间; 挥发性有机物; 气相-离子迁移色谱

Analysis of Volatile Organic Compounds in *Potentilla fruticosa* Black Tea with Different Storage Time by GC-IMS

ZHANG Yanrong¹, WU Jiayu¹, JING Hui^{2,3}, LIU Likuan^{1,3}, ZUO Wenming¹, LI Jinping^{1,3*}, ZENG Yang^{1,3*}

(1. The College of Life Science, The Key Laboratory of Medicinal Animal and Plant Resources in Qinghai-Tibetan Plateau in Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Qinghai Agricultural Technology Extension Station, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: To explore the effect of storage time on volatile organic compounds (VOCs) in *Potentilla fruticosa* black tea, the composition of VOCs in *P. fruticosa* black tea in 2019, 2020 and 2021 was determined by gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS). The results showed that 61 signal peaks were identified from *P. fruticosa* black tea samples by GC-IMS, and 43 VOCs were determined by built-in database, including 20 aldehydes, 8 ketones, 7 alcohols, 2 esters, 2 alkenes, 2 pyrazines and 1 furan. According to principal component analysis (PCA), the samples in 2019 were quite different from those in 2020 and 2021. The fingerprint analysis found that the type and the concentration of VOCs in 2021 were relatively large with the extension of storage time, and those of VOCs in 2019 were the lowest. Through the determination of importance of projection (VIP) value in partial least square regression, 14 potential characteristic VOCs in *P. fruticosa* black tea were analyzed. In combination of cluster heat map, it was found that with the extension of storage time, ethanol, benzaldehyde (M), 2-methylbutyraldehyde (D), dimethyl trisulfide and NF-12 increased gradually, while acetoin, hexanal, acetone, trans-2-pentenal, nonanal (M), 2-hexenal (M), NF-3, NF-4 and NF-18 decreased gradually.

Key words: *Potentilla fruticosa*; black tea; storage time; volatile organic compounds; gas chromatography-ion mobility spectroscopy

基金项目: 青海省科技创新创业人才工程项目(2020-2023)

作者简介: 张艳荣(1997—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 药用植物资源开发与利用。

*通信作者: 李锦萍(1973—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 资源生理生态学及资源化学研究; 曾阳(1964—), 男(汉), 教授, 硕士, 研究方向: 药用植物资源开发与利用。

引文格式:

张艳荣,吴家虞,景慧,等.基于GC-IMS分析不同储存时间金露梅红茶中挥发性有机物[J].食品研究与开发,2024,45(10):44-51.

ZHANG Yanrong, WU Jiayu, JING Hui, et al. Analysis of Volatile Organic Compounds in *Potentilla fruticosa* Black Tea with Different Storage Time by GC-IMS[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10):44-51.

金露梅(*Potentilla fruticosa* L.)又名药王茶、金老梅、金腊梅,为蔷薇科委陵菜属落叶灌木^[1]。金露梅味甘、性平,归心、肾经,主治消化不良、浮肿、赤白带下、乳腺炎等^[2]。现代研究表明金露梅中含有黄酮类、多酚类、苯丙素类和萜类等化合物^[3-4]。在青藏高原地区,金露梅又被称为“格桑梅朵”^[5],以叶片代茶历史悠久。

红茶属于全发酵茶,是世界上销量最大的茶类^[6],与绿茶的鲜醇甘爽相比,红茶香甜味醇^[7]。红茶中的咖啡因可提神消疲^[8];糖类、氨基酸、果胶可生津清热^[9];咖啡碱和芳香物质可利尿^[10];多酚类化合物能预防肥胖^[11]。将金露梅鲜叶在传统红茶的制作工艺基础上,经过筛选、揉捻、发酵、烘干制成金露梅红茶,在保证有效成分不流失的同时,将金露梅做成生活化产品金露梅红茶^[12]。金露梅红茶除了具有一般红茶的特性外,还具有降低高血脂症模型大鼠血脂以及调节肠道菌群的作用^[13]。

气相-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)是一种新兴的无损的检测技术,在无需样品前处理前提下,直接加热样品,顶空进样后可快速检测样品中的挥发性有机组分^[14]。目前,GC-IMS内置数据库已有600余种化合物,被广泛应用于许多领域,包括奶粉、酒水、粮食和水果等的分析^[15-18]。GC-IMS在茶叶风味检测方面的应用也较多,商虎等^[19]利用GC-IMS结合高效液相色谱技术对4种不同香型的老枳水仙茶的风味物质和主要有效成分进行分析,共发现139种有利于区别4种香型的香气物质,共定性出38种挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs),研究发现儿茶素品质指数的降低,对老枳水仙茶“枳味”的进一步提升有积极作用,实现了老枳水仙香型的快速判别。刘学艳等^[20]采用电子鼻和GC-IMS技术对云南省昌宁的8种红茶的VOCs进行分析,共分析检测出VOCs共8类91种,研究表明高等级红碎茶香气组分较多,野生茶树所制红茶香气比人工干预茶树挥发性物质丰富。王磊等^[21]利用GC-IMS技术对文冠果鲜叶、叶茶、花茶挥发性风味物质进行定性分析,发现文冠果鲜叶、叶茶、花茶中含量最高的物质分别是酯类、酮类、醛类。GC-IMS通过风味分析仪建立指纹图谱和主成分分析(principal component analysis, PCA)图等可将样品区分开,找出其规律和特征的VOCs,结合样品本身信息的差异进一步分析不同样品

的VOCs的差异特点。

目前对金露梅的研究多集中在其生理活性和化学成分上,而对由金露梅制成的红茶研究甚少,本研究以金露梅红茶的储存时间为变量,采用指纹图谱、主成分分析以及变量投影重要性值(variable importance for the projection, VIP)判定和聚类热图,研究储存时间对金露梅红茶中VOCs含量的影响,以期对金露梅红茶的质量监控和品质评价提供一定的理论数据。

1 材料与方法

1.1 材料

金露梅叶:采自青海省西宁市大通县宝库乡纳楞沟村,经过筛选—揉捻—发酵—烘干工序,分别于2019年、2020年、2021年制成金露梅红茶,金露梅红茶制成后存于通风干燥阴凉处保存,存放于青海师范大学。

1.2 仪器与设备

FlavourSpec®型气相离子迁移谱联用仪:德国G.A.S.公司;JC-223A+型电子天平:上海友声衡器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品预处理

取2g样品置于20mL顶空瓶中,孵育后进样,进行数据分析,每个样品取3次作为平行。

1.3.2 GC-IMS分析条件

自动顶空进样单元:进样体积500 μ L;孵育时间15min;孵育温度80 $^{\circ}$ C;进样针温度85 $^{\circ}$ C;孵化转速500r/min。

GC条件:MXT-5色谱柱(15m \times 0.53mm,1.00 μ m);柱温60 $^{\circ}$ C;分析时间20min;载气/漂移气为N₂;载气流速:0~2min流速为2mL/min,2~10min流速为10mL/min,10~20min流速为100mL/min,最终流速升至150mL/min。

IMS条件:温度45 $^{\circ}$ C;离子迁移管漂移器中以150mL/min流速吹气20min。

1.4 数据分析

利用GC \times IMS Library Search V 2.2.1分析软件、内置NIST数据库和IMS数据库对样品中VOCs进行定性分析。结合Gallery Plot插件,绘制指纹图谱进行差异对比,直观地比较3种不同储存时间的金露梅红茶样品之间的VOCs差异。利用MetaboAnalyst网页做

VIP 判定分析并绘图。采用 Origin 2018 软件绘制聚类热图和主成分分析图并分析。

2 结果与分析

2.1 不同储存时间金露梅红茶 GC-IMS 风味成分谱图分析

通过 GC-IMS 技术对不同储存时间金露梅红茶的

VOCs 进行检测,其二维谱图见图 1。谱图中的每一个点代表一种化合物,一种化合物可能会有两个或多个斑点,代表二聚体或多聚体。气味成分的含量通过颜色深浅呈现,颜色越深表示该物质含量越高^[22]。

为了更直观地分析不同储存时间金露梅红茶中 VOCs 的差异,扣除与 2019 年金露梅红茶相同部分得到的差异对比图见图 2。

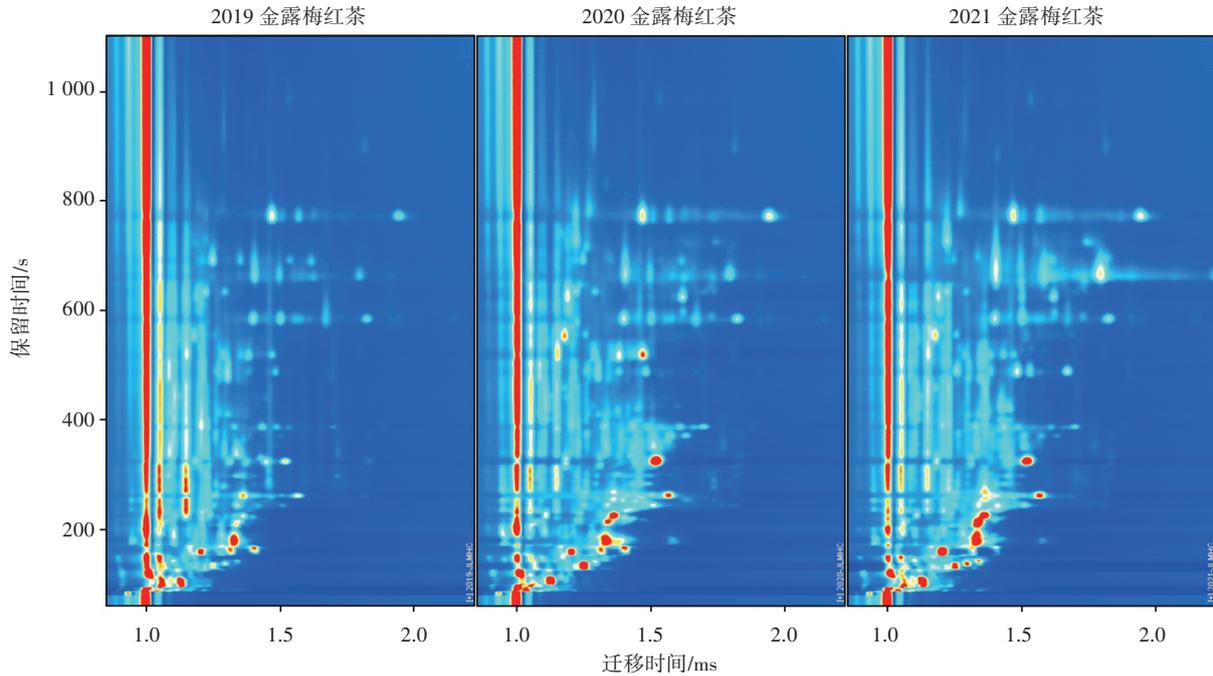
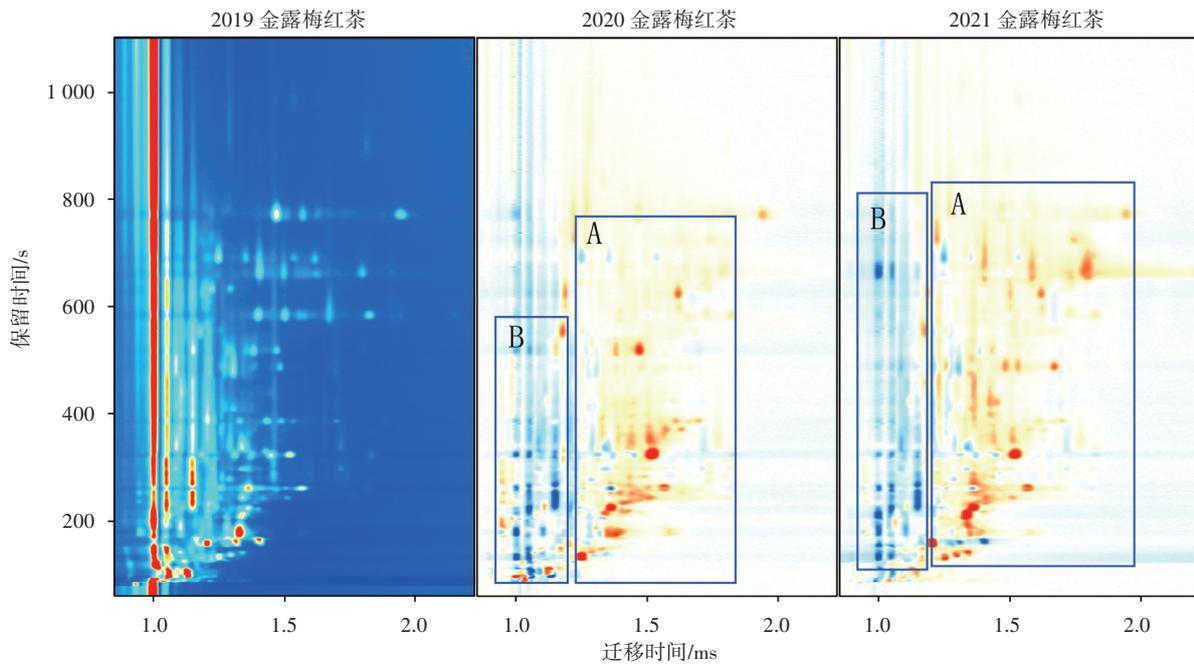


图 1 不同储存时间金露梅红茶中 VOCs 的二维图谱

Fig.1 Two-dimensional atlas of volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time



A 框中的斑点为相对于 2019 年金露梅红茶中含量增加的物质;B 框中的斑点为相对于 2019 年金露梅红茶中含量相对降低的物质。

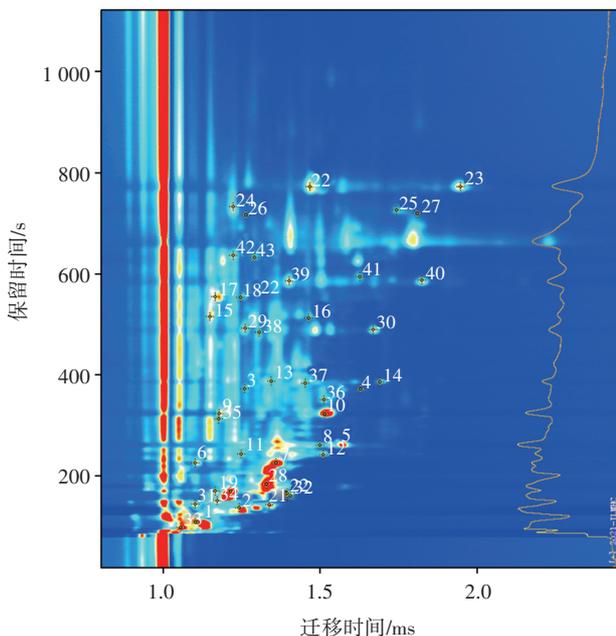
图 2 不同储存时间金露梅红茶中 VOCs 的差异对比

Fig.2 Comparison of volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

由图 1、图 2 可知,不同储存时间下,GC-IMS 能够分离金露梅红茶中的不同 VOCs,且这些物质的含量有升高或下降的趋势。从整体上看,2021 年金露梅红茶样品中红色点相对较多。这可能是由于在储存过程中,随着时间的推移,风味物质的含量有所增加。

2.2 不同储存时间金露梅红茶 GC-IMS 风味成分定性分析

金露梅红茶样品中挥发性有机物定性分析见图 3。



图中数字 1-43 分别表示不同化合物,与表 1 中化合物相对应。

图 3 不同储存时间金露梅红茶中 VOCs GC-IMS 定性

Fig.3 GC-IMS characterization of volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

由图 3 可知,在不同储存时间金露梅红茶样品的 61 个信号峰中共鉴定出包括单体和二聚体的 43 种已知 VOCs,包括 20 种醛类、8 种酮类、7 种醇类、2 种酯类、2 种烯类、2 种吡嗪类、1 个咪唑类和二甲基三硫,具体见表 1。

表 1 不同储存时间金露梅红茶的 VOCs

Table 1 Volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

分类	编号	化合物名称	CAS 号	保留时间/s	迁移时间/ms
酮类	1	丙酮	C67641	110.150	1.115 31
	2	2-丁酮	C78933	137.685	1.244 09
	3	2-庚酮(M)	C110430	372.974	1.261 37
	4	2-庚酮(D)	C110430	372.974	1.631 07
	8	2-己酮	C591786	261.370	1.501 52
	17	甲基庚烯酮	C110930	554.279	1.168 15
	37	环己酮	C108941	383.280	1.455 58
	28	3-羟基丁酮	C513860	183.378	1.331 10

续表 1 不同储存时间金露梅红茶的 VOCs

Continue table 1 Volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

分类	编号	化合物名称	CAS 号	保留时间/s	迁移时间/ms
醇类	11	1-戊醇(M)	C71410	243.312	1.250 58
	12	1-戊醇(D)	C71410	241.717	1.512 03
	26	氧化芳樟醇(M)	C60047178	716.207	1.265 98
	27	氧化芳樟醇(D)	C60047178	718.773	1.811 40
	33	乙醇	C64175	98.252	1.056 91
	34	异丁醇	C78831	151.091	1.173 01
	36	反式-2-己烯-1-醇	C928950	351.293	1.513 40
	酯类	21	乙酸乙酯	C141786	143.589
35	反式-2-丁烯酸乙酯	C623701	312.238	1.177 79	
烯类	42	双戊烯(M)	C138863	635.732	1.224 75
	43	双戊烯(D)	C138863	632.522	1.292 97
吡嗪类	24	2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪(M)	C13925070	733.527	1.224 31
	25	2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪(D)	C13925070	726.470	1.745 12
醛类	5	己醛	C66251	263.254	1.562 50
	6	反式-2-戊烯醛(M)	C1576870	750.500	1.103 03
	7	反式-2-戊烯醛(D)	C1576870	750.500	1.360 21
	9	2-己烯醛(M)	C505577	323.368	1.180 13
	10	2-己烯醛(D)	C505577	322.549	1.515 67
	13	庚醛(M)	C111717	387.623	1.345 74
	14	庚醛(D)	C111717	386.975	1.693 85
	15	苯甲醛(M)	C100527	514.716	1.149 68
	16	苯甲醛(D)	C100527	513.099	1.465 46
	19	2-甲基丁醛(M)	C96173	169.575	1.166 22
	20	2-甲基丁醛(D)	C96173	166.374	1.398 04
	22	壬醛(M)	C124196	772.657	1.265 98
	23	壬醛(D)	C124196	772.016	1.949 65
29	(E)-2-庚烯醛(M)	C18829555	492.843	1.262 02	
30	(E)-2-庚烯醛(D)	C18829555	489.918	1.671 27	
31	丁醛	C123728	143.891	1.103 75	
32	异戊醛	C590863	161.305	1.408 08	
39	正辛醛(M)	C124130	586.366	1.404 11	
40	正辛醛(D)	C124130	588.037	1.826 74	
41	(E,E)-2,4-庚二烯醛	C4313035	594.718	1.629 80	
咪唑类	18	2-正戊基咪唑	C3777693	553.734	1.248 38
其他类	38	二甲基三硫	C3658808	484.755	1.307 22

注:D 表示二聚体;M 表示单体;编号与图 3 中编号相对应。

由表 1 可知,金露梅红茶中醛类的单体和二聚体较多,刘真等^[23]利用 GC-IMS 技术对不同干燥方式玫瑰花茶的挥发性成分鉴定中,发现醛类的单体和二聚体最多。金文刚等^[24]在对不同产地“汉中仙毫”进行化合物鉴定时,共鉴定出 61 种挥发性物质,其中醛类物质最多。醛类物质对金露梅红茶香味呈现贡献较大,赋予金露梅红茶花果香、青草香味^[25-26]。

2.3 不同储存时间金露梅红茶挥发性成分主成分分析

PCA 分析是一种线性降维方法^[27],将高维数据映

射到低维空间,以较少的数据维度保留较多的原数据点特性^[28]。对不同储存时间金露梅红茶中的 VOCs 进行主成分分析,结果见图 4。

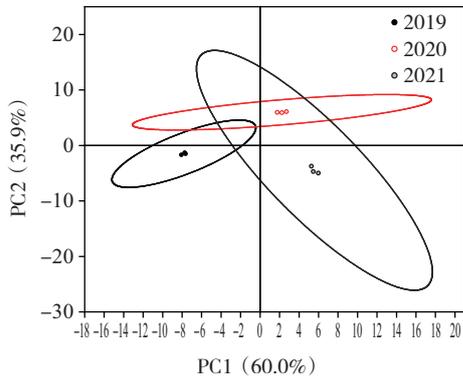


图 4 不同储存时间金露梅红茶中 VOCs 主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

由图 4 可知,主成分 1(PC1)贡献度最大达到 60.0%,主成分 2(PC2)贡献度为 35.9%,总贡献度为 95.9%,说明不同储存时间中,样品组间相似度高,重复性好,数据可信度高。通过 PCA 可以看出,2019 年金露梅红茶样品和 2020 年、2021 年金露梅红茶样品差异较大,2020 年和 2021 年金露梅红茶样品较为相似。说明基于 GC-IMS 结合 PCA 能够较好地地区分年份较长的金露梅红茶。

2.4 不同储存时间金露梅红茶 GC-IMS 风味成分指纹图谱分析

为了更清晰地分析不同时间金露梅红茶中风味成分的差异,对金露梅红茶 GC-IMS 风味成分进行指纹图谱分析,结果见图 5。

由图 5 可知,A 区域中为随着储存时间的延长,含量相对升高的物质,即 2019 年的金露梅红茶样品中乙醇、二甲基三硫以及物质 12 含量较高。B 区域中为随

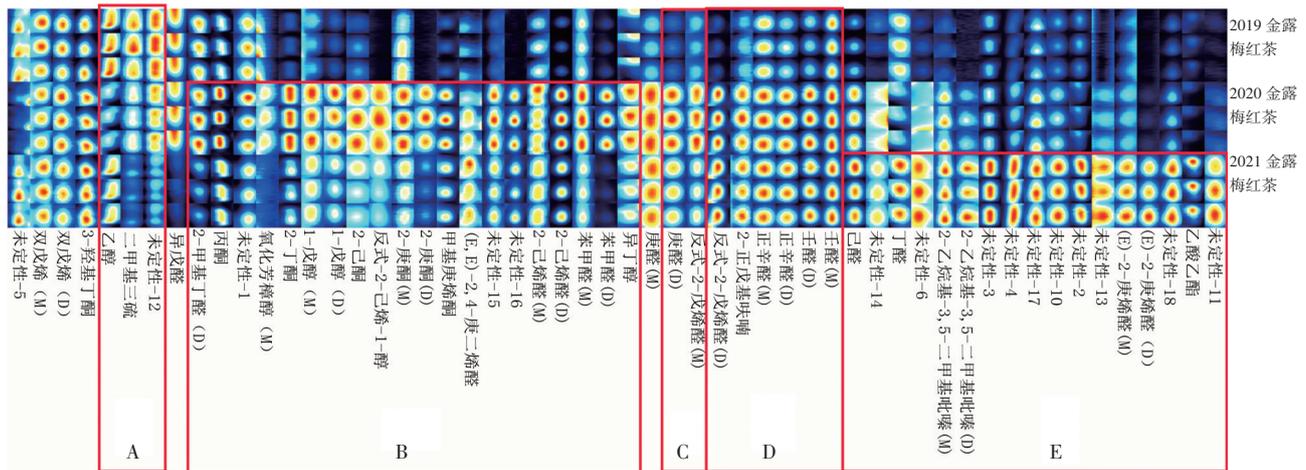


图 5 不同储存时间金露梅红茶中 VOCs 指纹图谱

Fig.5 Fingerprint of volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

着储存时间的延长,VOCs 含量先升高后降低的物质,即 2020 年金露梅红茶样品中 2-甲基丁醛(D)、丙酮、1-氧化芳樟醇、2-丁酮、1-戊醇(M)、1-戊醇(D)、2-己酮、反式-2-己烯-1-醇、2-庚酮(M)、2-庚酮(D)、甲基庚烯酮、(E,E)-2,4-庚二烯醛、15、16、2-己烯醛(M)、2-己烯醛(D)、苯甲醛(M)、苯甲醛(D)、异丁醇等物质含量较高。C 区域中为随着时间延长,含量先升高后降低的物质,即在 2020 年的金露梅红茶样品中庚醛(D)和反式-2-戊烯醛(M)含量最高。D 区域中为随着时间的延长含量逐渐降低的物质,即 2019 年金露梅红茶样品中反式-2-戊烯醛(D)、2-正戊基呋喃、正辛醛(M)、正辛醛(D)、壬醛(D)、壬醛(M)。其中 2-正戊基呋喃的减少可能是红茶香味降低的原因^[29]。E 区域中为随着储存时间的延长,含量逐渐降低的物质,即 2021 年金露

梅红茶样品中己醛、14、丁醛、6、2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪(M)、2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪(D)、3、4、17、10、2、13、(E)-2-庚烯醛(M)、(E)-2-庚烯醛(D)、18、乙酸乙酯、11 等物质含量较高。

从指纹图谱整体看,2021 年金露梅红茶 VOCs 的种类和浓度相对较大,且未被定性的物质浓度高,有可能是金露梅红茶中的特征性成分,随着时间的延长其浓度逐渐降低。

2.5 基于 VIP 鉴定不同年份金露梅红茶的特征成分

对 GC-IMS 检测出的 61 个信号峰进行变量投影重要性值(VIP)鉴定,寻找金露梅红茶中的特征性物质^[30]。一种 VOCs 被认为是潜在标志物的条件是此成分的 VIP 应大于 1^[31]。筛选出 VIP>1 的特征标志物见图 6。

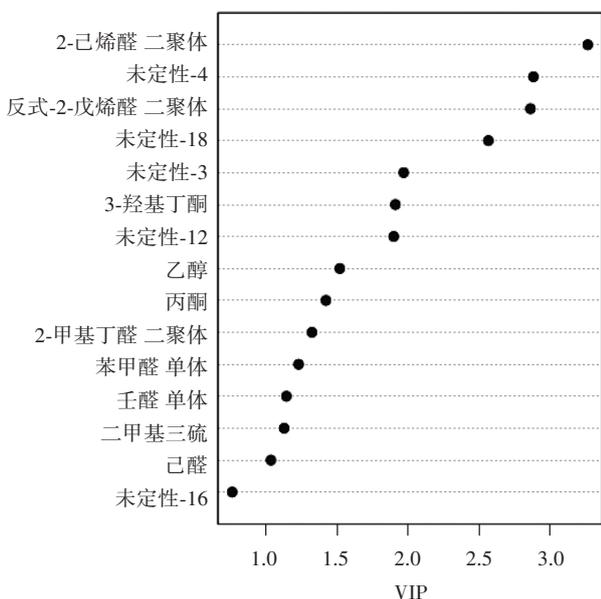


图6 PLS-DA 鉴别模型 VIP>1 的特征标志物

Fig.6 Characteristic markers of VIP>1 in PLS-DA identification model

由图6所示,在不同年份金露梅红茶模型中共筛选出VIP>1的特征标志物14个,其中能够被定性识别的包括:2-己烯醛(D)、反式-2-戊烯醛(D)、3-羟基丁酮、乙醇、丙酮、2-甲基丁醛(D)、苯甲醛(M)、壬醛(M)、二甲基三硫、己醛,共10种。

根据VIP筛选出来的14个特征化合物做出VOCs的数据热图见图7。

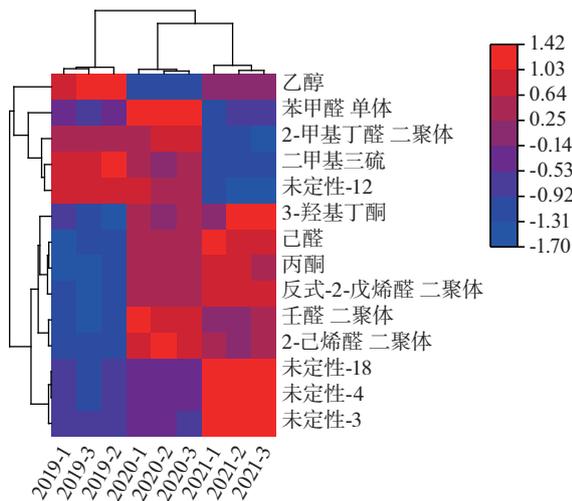


图7 不同年份金露梅红茶特征VOCs的聚类热图

Fig.7 Cluster heat map of characteristic volatile organic compounds in *Potentilla fruticosa* black tea with different storage time

由图7可知,金露梅红茶随着储存时间的延长,乙醇、苯甲醛(M)、2-甲基丁醛(D)、二甲基三硫、未定性-12等含量逐渐升高,而3-羟基丁酮、己醛、丙酮、反式-2-戊烯醛、壬醛(M)、2-己烯醛(M)、未定性-3、未定性-

4、未定性-18等逐渐降低。其中2-己烯醛赋予红茶青草味和水果清香,是茶叶清香成分之一^[32]。3-羟基丁酮具有乳香和奶油味,在西湖龙井中含量也较高^[33]。2-甲基丁醛具有黄油和焦糖香味,是茶叶的特征香味之一,且可能与茶叶香气品质形成有关^[34]。苯甲醛具有杏仁味,是茶叶中常见的VOCs,也是特征香味之一^[35]。壬醛具有花香、青柑橘味,是红茶和黑茶中主要的VOCs之一^[36]。己醛具有青苹果味,在四川康砖茶(藏茶)中含量较高^[37]。

3 结论

本研究采用GC-IMS技术检测不同年份金露梅红茶中VOCs,共鉴定出61种VOCs,其中定性出43种VOCs,包括20种醛类、8种酮类、7种醇类、2种酯类、2种烯类、2种吡嗪类、1个呋喃类和二甲基三硫,除了为金露梅红茶贡献了青味、果香、花香香味等红茶香味,还呈现出特殊的金露梅香味。通过对不同储存年份金露梅红茶中VOCs的主成分分析发现,两个主成分的总贡献率高达95.9%,可有效区分3种样品,主成分分析表明,2019年金露梅红茶样品和2020年、2021年金露梅红茶样品差异较大,2020年和2021年金露梅红茶样品较为相似。由指纹图谱分析可知,2021年金露梅红茶VOCs的种类和浓度相对较大,2019年金露梅红茶中VOCs的种类和浓度最小。通过偏最小二乘法中的VIP判定,分析出金露梅红茶中14种潜在特征性有机化合物,结合此14种潜在特征性有机化合物聚类热图分析发现,金露梅红茶随着储存时间的延长,乙醇、苯甲醛(M)、2-甲基丁醛(D)、二甲基三硫、NF-12等含量逐渐升高,而3-羟基丁酮、己醛、丙酮、反式-2-戊烯醛、壬醛(M)、2-己烯醛(M)、NF-3、NF-4、NF-18等逐渐降低。本研究为鉴定金露梅红茶的生产年份提供了一定的理论依据,为其他茶叶类产品的生产与存储时间的鉴定上提供一种更先进高效的检测和分析方法。

参考文献:

- [1] 严培瑛,刘力宽,曾阳,等.金露梅对T2DM大鼠脂代谢关键酶和激素表达的影响[J].中国药理学通报,2019,35(2):293-294. YAN Peiying, LIU Likuan, ZENG Yang, et al. Effects of *Fruticosa potentilla* L. on expression of glucose and lipid metabolism key enzymes and hormones in T2DM rats[J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2019, 35(2): 293-294.
- [2] 王国强.全国中草药汇编[M].北京:人民卫生出版社,2014. WANG Guoqiang. National compendium of Chinese herbal medicine [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2014.
- [3] 皮立,冯海生,朱青云,等.青海省不同生态区野生金露梅叶生物活性成分分析和评价[J].食品工业科技,2019,40(4):261-265. PI Li, FENG Haisheng, ZHU Qingyun, et al. Analysis and assessment of bioactive components of *Potentilla fruticosa* leaves in different ecological areas of Qinghai Province[J]. Science and Technol-

- ogy of Food Industry, 2019, 40(4): 261-265.
- [4] 孙玉侠. 金露梅化学成分及生物活性的研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2017.
SUN Yuxia. Research on chemical constituents and pharmacological activities of *Potentilla fruticosa* L. [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2017.
- [5] 秦新惠, 林燕. 格桑花的起源及其内涵研究[J]. 昆明学院学报, 2016, 38(6): 90-93, 99.
QIN Xinhui, LIN Yan. Study on the origin and connotation of gesang flowers[J]. Journal of Kunming University, 2016, 38(6): 90-93, 99.
- [6] HONG Z Q, ZHANG C, KONG D D, et al. Identification of storage years of black tea using near-infrared hyperspectral imaging with deep learning methods[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 114: 103666.
- [7] 李琛, 岳翠男, 杨普香, 等. 工夫红茶特征香气研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8834-8842.
LI Chen, YUE Cuinan, YANG Puxiang, et al. Research progress on characteristic aroma of Congou black tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(22): 8834-8842.
- [8] 郑福维, 徐琳沁, 米楚阳, 等. 茶园不同修剪期小气候对保靖黄金茶的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S1): 247-251.
ZHENG Fuwei, XU Linqin, MI Chuyang, et al. Effect of microclimate in different pruning periods on Baojing Golden Tea[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(S1): 247-251.
- [9] 闫旭宇, 李娟, 李玲. 响应面优化超声辅助提取黄秋葵嫩果黄酮工艺及其清除羟自由基能力[J]. 中国调味品, 2021, 46(10): 164-168, 172.
YAN Xuyu, LI Juan, LI Ling. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process of flavonoids from tender okra fruit by response surface method and their hydroxyl radical scavenging ability[J]. China Condiment, 2021, 46(10): 164-168, 172.
- [10] RIESENHUBER A, BOEHM M, POSCH M, et al. Diuretic potential of energy drinks[J]. Amino Acids, 2006, 31(1): 81-83.
- [11] ASHIGAI H, TANIGUCHI Y, SUZUKI M, et al. Fecal lipid excretion after consumption of a black tea polyphenol containing beverage-randomized, placebo-controlled, double-blind, crossover study [J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2016, 39(5): 699-704.
- [12] 曾阳, 刘力宽, 代芸, 等. 一种金露梅茶自动滚炒机: CN206586300U[P]. 2017-10-27.
ZENG Yang, LIU Likuan, DAI Yun, et al. A kind of *Potentilla fruticosa* tea automatic rolling frying machine: CN206586300U[P]. 2017-10-27.
- [13] 李彩明, 张得宁, 刘力宽, 等. 青藏高原金露梅茶对高脂血症大鼠肠道菌群的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 366-371.
LI Caiming, ZHANG Dening, LIU Likuan, et al. Effect of *Potentilla fruticosa* tea from qinghai-tibet Plateau on Intestinal flora of hyperlipidemia rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 366-371.
- [14] HAN Y Q, WANG C, ZHANG X L, et al. Characteristic volatiles analysis of Dongbei Suancai across different fermentation stages based on HS-GC-IMS with PCA[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(2): 612-622.
- [15] FENG D, WANG J, JI X J, et al. HS-GC-IMS detection of volatile organic compounds in yak milk powder processed by different drying methods[J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 141: 110855.
- [16] LI S Y, YANG H F, TIAN H H, et al. Correlation analysis of the age of brandy and volatiles in brandy by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2020, 157: 104948.
- [17] SONG J X, SHAO Y, YAN Y M, et al. Characterization of volatile profiles of three colored quinoas based on GC-IMS and PCA[J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 146: 111292.
- [18] LENG P, HU H W, CUI A H, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds of honey peach packaged with different preservation methods during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111963.
- [19] 商虎, 朱陈松, 叶婷婷, 等. 老枞水仙品质特征分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(10): 141-148.
SHANG Hu, ZHU Chensong, YE Tingting, et al. The quality characteristics of *Camellia sinensis* 'Fujian Shuixian'[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(10): 141-148.
- [20] 刘学艳, 王娟, 彭云, 等. 基于电子鼻与 GC-IMS 技术云南昌宁红茶香气研究[J]. 茶叶通讯, 2021, 48(1): 80-89.
LIU Xueyan, WANG Juan, PENG Yun, et al. Study on the aroma of Yunnan Changning black tea based on electronic nose and gas chromatography-Ion mobility spectroscopy[J]. Journal of Tea Communication, 2021, 48(1): 80-89.
- [21] 王磊, 路昌, 刘莉, 等. 基于气相离子迁移谱对不同文冠果茶挥发性成分的分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(9): 159-168.
WANG Lei, LU Chang, LIU Li, et al. Analysis of volatile compounds in different *Xanthoceras sorbifolia* bunge products for tea by gas chromatography - ion mobility spectrometry[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9): 159-168.
- [22] HE W, REN F, WANG Y Q, et al. Application of GC-IMS in detection of food flavor substances[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 545(1): 012030.
- [23] 刘真, 汤晓娟, 王彬, 等. 基于风味成分分析的不同干燥方式玫瑰花茶鉴别技术研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(12): 3842-3849.
LIU Zhen, TANG Xiaojuan, WANG Bin, et al. Study on identification technology of rose tea with different drying methods based on flavor compounds analysis[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(12): 3842-3849.
- [24] 金文刚, 陈小华, 耿敬章, 等. 基于气相-离子迁移谱分析不同产地“汉中仙毫”气味指纹差异[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 231-237.
JIN Wengang, CHEN Xiaohua, GENG Jingzhang, et al. Analysis of 'Hanzhong Xianhao' odor fingerprints from different places based on GC-IMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 231-237.
- [25] 颜廷宇, 林洁鑫, 朱建新, 等. 电子鼻和 GC-MS 结合化学计量学应用于高香红茶与传统工夫红茶香气特征的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 252-261.
YAN Tingyu, LIN Jiexin, ZHU Jianxin, et al. Analysis of E-nose and GC-MS combined with chemometrics applied to the aroma characteristics of high aroma black tea and traditional congou black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 252-261.
- [26] 谢关华, 陆安霞, 欧阳珂, 等. GC-MS 结合化学计量学用于探究六大茶类香气形成的差异[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 260-270.
XIE Guanhua, LU Anxia, OUYANG Ke, et al. Analysis of the aroma formation in six categories of teas by GC-MS combined with chemometrics[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 260-270.
- [27] 常博文. 外源乙烯调控长春花萜类吡啶生物碱合成的代谢和转录组分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
CHANG Bowen. Metabolome and transcriptome analysis of TIAs biosynthesis in *Catharanthus roseus* induced by exogenous ethylene [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.

- [28] 刘彬球, 陈孝权, 吴晓刚, 等. PCA 和 PLS-DA 用于晒青毛茶级别分类研究[J]. 茶叶科学, 2015, 35(2): 179-184.
LIU Binqiu, CHEN Xiaoquan, WU Xiaogang, et al. Study of Pu'er raw materials grade classification by PCA and PLS-DA[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(2): 179-184.
- [29] 张厅, 刘晓, 唐晓波, 等. 不同嫩度红茶坯对玫瑰红茶品质的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(1): 90-97.
ZHANG Ting, LIU Xiao, TANG Xiaobo, et al. Effect of tea dhool with different tenderness on quality of rose black tea[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(1): 90-97.
- [30] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 192-198.
YIN Hongxu, YANG Yanqin, YAO Yuefeng, et al. Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical data analysis[J]. Food Science, 2019, 40(4): 192-198.
- [31] 梅芬. 麻黄—石膏药对配伍的化学成分、药效及代谢组学研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2013.
MEI Fen. Study on chemical constituents, pharmacological effects and metabonomics of Traditional Chinese Herb pair, *Ephedra* and *Gypsum*[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2013.
- [32] 黄旦益, 齐冬晴, 沈程文, 等. 不同乌龙茶品种(品系)鲜叶香气组分的初步研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 189-199.
HUANG Danyi, QI Dongqing, SHEN Chengwen, et al. The preliminary study of fresh leaves aroma components of different oolong tea varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(10): 189-199.
- [33] 朱荫, 杨婷, 施江, 等. 西湖龙井茶香气成分的全二维气相色谱-飞行时间质谱分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(20): 4120-4146.
ZHU Yin, YANG Ting, SHI Jiang, et al. Analysis of aroma components in Xihu Longjing tea by comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(20): 4120-4146.
- [34] 夏益民, 王近近, 袁海波. 后发酵工艺对夏秋红茶品质形成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 180-189.
XIA Yimin, WANG Jinjin, YUAN Haibo. Effect of post-fermentation process on the quality of summer-autumn black tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 180-189.
- [35] 《中国茶学辞典》编纂委员会. 中国茶学辞典[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995.
<Dictionary of China Tea Science> Codification Committee. Dictionary of China Tea Science[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1995.
- [36] 张翔, 王聪明, 聂枫宁, 等. 川红和祁红香气特征分析及成分比较[J]. 热带作物学报, 2020, 41(7): 1440-1449.
ZHANG Xiang, WANG Congming, NIE Congning, et al. Comparison of volatile components and aroma characterization in Sichuan black tea and Qimen black tea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(7): 1440-1449.
- [37] 张婷, 倪辉, 伍菱, 等. 康砖茶叶风味特征及挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 215-221.
ZHANG Ting, NI Hui, WU Ling, et al. Analysis of flavor characteristics and volatile compounds of Kangzhuang tea[J]. Food Science, 2020, 41(6): 215-221.

责任编辑:张璐

收稿日期:2023-02-13