

基于 HS - GC - IMS 分析陇南主栽品种 初榨橄榄油的风味特征成分

白万明¹, 王菊花², 马赛买², 白小勇¹, 孔维宝², 马君义², 张继²

(1. 陇南田园橄榄科技开发有限公司, 甘肃 陇南 746010; 2. 西北师范大学生命科学院, 兰州 730070)

摘要: 旨在为我国甘肃陇南产区初榨橄榄油 (VOO) 的快速鉴别以及工业生产过程中的风味品质评价提供数据支撑和理论依据, 采用 HS - GC - IMS 技术对甘肃陇南主栽品种莱星 (LX)、佛奥 (FO)、科拉蒂 (KLD)、皮刺利 (PXL)、鄂植 8 号 (EZ8) 以及 LX 与 KLD 的混合品种 (HH) 6 种 VOO 中的风味特征成分进行定性和差异分析。结果表明: 6 种 VOO 中共检测出 39 种风味特征物质, 定性出 22 种, 其中醛类 (9 种)、酮类 (5 种) 化合物为主要的风味特征成分, 此外还包括酯类 (3 种)、醇类 (3 种)、萜烯类 (1 种) 和呋喃类 (1 种) 等物质; 6 种 VOO 中含有的风味特征物质均存在不同程度的差异, 其中, LX、KLD 和 HH 中的风味特征物质较为相似, 其 2 - 甲基丁醛、3 - 甲基丁醛、(E) - 2 - 戊烯醛、辛醛和 2 - 正戊基呋喃含量较高, FO 中的正戊醇、正己醛和 3 - 戊酮含量较高, PXL 中的 (Z) - 3 - 己烯乙酸酯、 α - 松油烯、2 - 己酮的含量较高, EZ8 中的乙酸乙酯含量最高, HH 中的 2 - 丁酮、丙酮、(E) - 2 - 庚烯醛的含量较高。综上, 采用 HS - GC - IMS 可以有效检测 VOO 中的风味特征物质, 定性出的风味特征物质可作为区分 6 种 VOO 的依据之一。

关键词: 初榨橄榄油; 风味特征成分; HS - GC - IMS; 指纹图谱; 主成分分析

中图分类号: TS222 + .1; TS227 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 7969 (2024) 03 - 0021 - 06

Analysis of flavor characteristic components in the main cultivars of virgin olive oil from Longnan based on HS - GC - IMS

BAI Wanming¹, WANG Juhua², MA Saimai², BAI Xiaoyong¹,
KONG Weibao², MA Junyi², ZHANG Ji²

(1. Longnan Garden Olive Technology Development Co., Ltd., Longnan 746010, Gansu, China;

2. College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming to provide data support and theoretical basis for the rapid identification of virgin olive oil (VOO) in Longnan, Gansu province and the evaluation of flavor quality in the industrial production process, HS - GC - IMS technology was used to qualitatively and differentially analyze the flavor characteristic component of six kinds of VOO extracted from main cultivars in Longnan (Gansu) Leccino (LX), Frantoio (FO), Coratina (KLD), Picholine (PXL), Ezhi - 8 (EZ8) and mixed with LX and KLD varieties (HH). The results showed that a total of 39 volatile flavor components were detected in six kinds of VOO, and 22 compounds were identified, among which aldehydes (9 kinds) and ketones (5

kinds) were the main flavor characteristic components, also including esters (3 kinds), alcohols (3 kinds), terpenes (1 kind), and furans (1 kind). The flavor characteristic components of six kinds of VOO were different in different degrees, among which the flavor characteristic components in LX, KLD and HH were similar, and the contents of 2 -

收稿日期: 2022 - 10 - 04; 修回日期: 2023 - 10 - 15

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD1002402 - 03); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目 (2021CYZC - 37); 西北师范大学重大科研项目培育计划项目 (NWN - LKZD2022 - 02)

作者简介: 白万明 (1990), 男, 工程师, 主要从事油橄榄资源研发与生产 (E-mail) 1005179156@qq.com。

通信作者: 孔维宝, 教授, 博士生导师 (E-mail) kwbao@163.com。

methylbutanal, 3-methylbutanal, (*E*)-2-pentenal, octanal and 2-pentylfuran were higher. The contents of *n*-pentanol, hexanal and 3-pentanone in FO were higher. The contents of (*Z*)-3-hexenyl acetate, α -terpinene and 2-hexanone in PXL were higher. Ethyl acetate was the main flavor characteristic component in EZ8. The main flavor characteristics components in HH included 2-butanone, acetone and (*E*)-2-heptenal. In conclusion, HS-GC-IMS can effectively detect the flavor characteristic component in VOO, and the flavor characteristic components identified can be used as one of the bases for distinguishing the six kinds of VOO.

Key words: virgin olive oil; flavor characteristic component; HS-GC-IMS; fingerprint; principal component analysis

油橄榄 (*Olea europaea* L.) 属于木樨科木樨榄属 (*Olea*) 常绿乔木, 是本油料兼果用树种^[1]。截至 2021 年, 甘肃油橄榄种植面积约 3.44 万 hm^2 , 占全国的 60%^[2]。以油橄榄鲜果为原料榨取的初榨橄榄油 (VOO) 富含多种不饱和脂肪酸和其他活性营养物质, 具有抑菌、抗炎、抗氧化等功效, 可预防心血管疾病、癌症、糖尿病等疾病的发生^[3-4]。橄榄油中的挥发性物质影响着橄榄油的感官特性, 赋予橄榄油独特的风味, 也是影响消费者选择橄榄油产品的重要因素之一。因此, 研究橄榄油风味物质组成具有重要意义。

研究发现, VOO 中含有的挥发性风味物质已超过 180 余种, 主要包括醛类、酮类、酯类、醇类、萜烯类以及呋喃类等^[5]。橄榄油中挥发性风味物质的检测方法有气相色谱-质谱 (GC-MS)、电子鼻、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (HS-SPME-GC-MS)、气相色谱-质谱-嗅闻 (GC-MS-O) 等方法^[5-8]。如: Cecchi 等^[6]利用 HS-SPME-GC-MS 分析了意大利特级初榨橄榄油 (EVOO) 的感官特性, 发现挥发性化合物的主要成分为 C6 化合物, 且因地域和基因型的不同而存在差异; 邓龙等^[7]采用 GC-MS-O 结合电子鼻技术从 8 种市售 VOO 中共检测出 108 种挥发性成分, 为区分不同品牌 VOO 提供了新方向; Kesen 等^[8]利用 GC-MS-O 技术分析了土耳其 VOO 的香气风味物质, 得出醛类、醇类是其主要的风味活性物质。近年来, 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 因具有易操作、灵敏度高、速度快、结果直观且准确度高等特点^[9]被广泛应用于食品质量检测与风味评价研究领域^[10-11]。GC-IMS 在食品风味研究中应用尤为广泛, 主要涉及食品风味成分分析^[12]、食品分类及掺假^[13]、生产加工过程中质量评估以及食品关键风味成分表征^[14]等。Garrido-Delgado 等^[15]采用 GC-IMS 对不同类别橄榄油中的

风味特性进行了表征, 发现不同挥发性物质在不同类别的橄榄油中存在显著性差异, 证明 GC-IMS 可作为一种可靠的分析鉴别技术以用于橄榄油样品的分类鉴定。但是, 目前采用该技术对国产 VOO 挥发性风味物质进行分析和评价的报道还很少。

经过半个多世纪的发展, 我国本土橄榄油产业已初具规模, 但是由于针对国产橄榄油营养组成、特征成分及品质评价体系的研究工作还不完善, 导致其鉴别分级和价值宣传缺乏充分的科学数据支撑。鉴于 GC-IMS 具有简单易操作且分辨率较高等优势, 本文采用顶空-气相色谱-离子迁移谱 (HS-GC-IMS) 分析甘肃陇南主栽品种莱星 (LX)、佛奥 (FO)、皮削利 (PXL)、鄂植 8 号 (EZ8)、科拉蒂 (KLD) 以及 LX 与 KLD 的混合品种 (HH) 6 种 VOO 样品的风味特征成分组成, 旨在为我国甘肃陇南产区 VOO 的快速鉴别以及工业生产过程中的风味品质评价提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

莱星 (LX)、佛奥 (FO)、科拉蒂 (KLD)、皮削利 (PXL)、鄂植 8 号 (EZ8) 单品种 VOO, LX 和 KLD 的混合品种 (HH) VOO, 陇南田园橄榄油科技开发有限公司。

顶空-气相色谱-离子迁移色谱联用仪、FlavourSpec[®] 风味分析仪, G. A. S. 公司; VOCal 软件 (含 Reporter、Gallery Plot 和 Dynamic PCA 插件)。

1.2 实验方法

1.2.1 VOO 的 HS-GC-IMS 测定

取 1 mL VOO 样品置于 20 mL 顶空瓶中, 在顶空孵育温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 、孵育时间 15 min、转速 500 r/min 条件下孵育 15 min 后进行 GC-IMS 测定。测定条件: MXT-5 色谱柱 (15 m \times 0.53 mm, 1.0 μm), 柱温 60 $^{\circ}\text{C}$; 载气/漂移气为 N_2 ; IMS 温度 45 $^{\circ}\text{C}$; 自动顶

空进样单元,进样量 500 μL ,进样针温度 85 $^{\circ}\text{C}$;漂移管内线性电压 500 V/cm,漂移管长度 5.3 cm;分析时间 20 min。

1.2.2 数据处理与分析

采用 VOCal 软件中内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对 VOO 样品中的挥发性物质进行定性分析。仪器配套的 Reporter 插件用于查看样品图谱和分析图谱间的差异性,Gallery Plot 插件用于指纹图谱的对比,直观定量比较样品之间所含挥发性有机物的差异。采用 Dynamic PCA 插件对所测样品进行动态主成分分析(PCA)。每个 VOO 样品测定 3 个平行样。

2 结果与分析

2.1 不同品种 VOO 风味特征成分的 HS - GC - IMS 谱图对比分析

图 1 为不同品种 VOO 风味特征成分的 HS - GC - IMS 二维谱图。

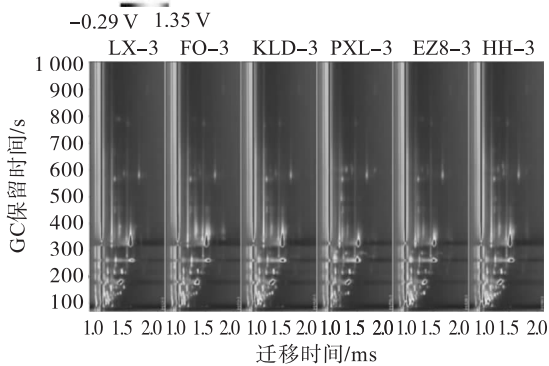


图 1 不同品种 VOO 风味特征成分的 HS - GC - IMS 二维谱图

图 1 中反应离子峰(RIP)两侧的每一个点代表一种风味特征物质,其颜色深浅和面积大小代表风味物质浓度的高低,面积越大和颜色越深表示风味

特征成分浓度越高^[16-17]。由图 1 可知,6 种 VOO 的风味特征成分在 400 s 以内均有保留,且 6 种 VOO 的风味特征成分的种类和浓度均存在不同程度的差异。

为更明显地比较 6 种 VOO 之间风味特征成分的差异,通过 Reporter 插件以 LX 样品图为参照,其他样品谱图做颜色抵消,即当风味特征物质浓度高于参照时颜色呈现红色,反之呈现蓝色^[18-19],结果如图 2 所示。

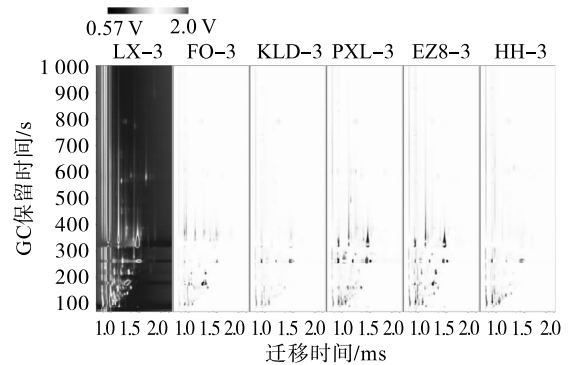
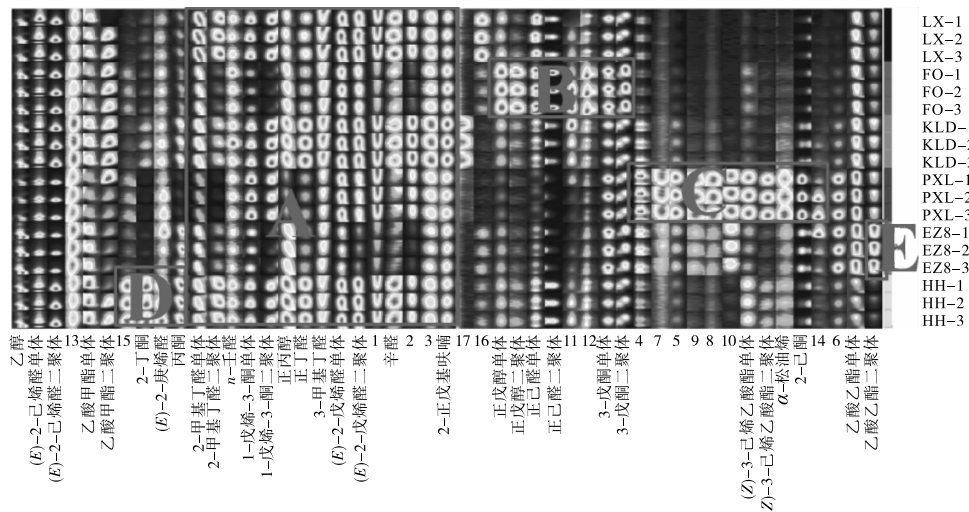


图 2 不同品种 VOO 风味特征成分的 HS - GC - IMS 差异谱图

由图 2 可知,PXL 和 EZ8 的 VOO 谱图中有较多红色斑点,表明 PXL 和 EZ8 的 VOO 中含有的风味特征成分与其他 4 种 VOO 的有明显差异,而 LX、FO、KLD 和 HH 4 种 VOO 之间含有的风味特征成分存在差异,但不明显。

2.2 不同品种 VOO 风味特征成分的指纹图谱及其定性分析

为进一步探索不同品种 VOO 风味特征成分的差异,采用 Gallery Plot 插件制得 6 种 VOO 的指纹图谱,如图 3 所示。



注:图中标记的数字表示指纹图谱中未定性的物质;物质的单体与其二聚体为同一物质

图 3 不同品种 VOO 风味特征成分 Gallery Plot 指纹图谱

由图3可知,不同品种VOO中共检出39种风味特征物质,其中定性出22种,有17种未定性。6种VOO的风味特征成分组成均存在差异,其中:PXL的风味特征成分组成差异最大,EZ8的风味特征物质较少,LX、KLD、HH的风味特征物质种类及浓度较为相似。从图3中A区域可知,某些风味特征物质在LX、KLD和HH中的含量均较高且高于其他3种VOO,主要有2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、(E)-2-戊烯醛、辛醛和2-正戊基呋喃。由图3中B、C、D和E区域可知:正戊醇、正己醛和3-戊酮在FO中的含量最高;(Z)-3-己烯乙酸酯、 α -松油烯、2-己酮在PXL中的含量最高,可作为区分PXL样品的依据之一;2-丁酮、丙酮、(E)-2-庚烯醛在HH中的含量较高;乙酸乙酯在EZ8中的含

量最高,并且EZ8风味特征成分主要为乙酸乙酯。

通过使用HS-GC-IMS Library Search软件结合其内置的NIST和IMS数据库,对不同品种VOO中的风味特征成分进行定性分析,结果如表1所示。由表1可知,从6种VOO中定性出22种风味特征物质,主要包括醛类、酮类、酯类、醇类、萜烯类和呋喃类等物质。赵玉等^[20]采用GC-MS和GC-O技术检测甘肃陇南3种VOO(LX、EZ8、特级混合)中的关键风味成分,结果表明,检测出的成分包含醛类、醇类、酯类、酮类等;邓龙等^[7]采用GC-MS-O并结合电子鼻检测了8种市售VOO的挥发性成分,其中主要包括醇类、醛类、酯类、酮类、酸类等;本研究结果与上述结果差异不大。

表1 不同品种VOO中定性出的风味特征成分

化合物	CAS号	分子式	相对分子质量	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms
酮类(5种)						
丙酮	67-64-1	C ₃ H ₆ O	58.1	538.7	111.247	1.126
2-丁酮	78-93-3	C ₄ H ₈ O	72.1	592.4	134.678	1.248
1-戊烯-3-酮	1629-58-9	C ₅ H ₈ O	84.1	687.7	176.299	1.310
3-戊酮	96-22-0	C ₅ H ₁₀ O	86.1	699.2	185.193	1.353
2-己酮	591-78-6	C ₆ H ₁₂ O	100.2	795.9	265.866	1.499
醇类(3种)						
乙醇	64-17-5	C ₂ H ₆ O	46.1	528.1	106.623	1.051
正丙醇	71-23-8	C ₃ H ₈ O	60.1	571.2	125.429	1.114
正戊醇	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	88.1	773.2	244.240	1.508
醛类(9种)						
3-甲基丁醛	590-86-3	C ₅ H ₁₀ O	86.1	636.8	154.080	1.170
(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	C ₇ H ₁₂ O	112.2	959.6	491.591	1.262
正丁醛	123-72-8	C ₄ H ₈ O	72.1	601.5	138.686	1.290
2-甲基丁醛	96-17-3	C ₅ H ₁₀ O	86.1	659	163.762	1.402
(E)-2-戊烯醛	1576-87-0	C ₅ H ₈ O	84.1	753.3	228.316	1.364
辛醛	124-13-0	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1 012.3	588.049	1.400
n-壬醛	124-19-6	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1 107.4	773.277	1.474
(E)-2-己烯醛	6728-26-3	C ₆ H ₁₀ O	98.1	856.6	332.805	1.522
正己醛	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	100.2	794.1	263.897	1.567
酯类(3种)						
乙酸甲酯	79-20-9	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	494.9	92.133	1.191
乙酸乙酯	141-78-6	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	607.8	141.438	1.340
(Z)-3-己烯乙酸酯	3681-71-8	C ₈ H ₁₄ O ₂	142.2	1 018.4	599.932	1.817
其他(2种)						
α -松油烯	99-86-5	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1 019.5	602.029	1.220
2-正戊基呋喃	3777-69-3	C ₉ H ₁₄ O	138.2	1 000.5	564.983	1.238

由表1还可知,6种VOO中醛类物质最丰富,其主要由脂肪氧化分解产生,一般具有青草香、油脂香等气味^[21]。6种VOO中共检出9种醛类化合物,分别为(E)-2-己烯醛(青草香、油脂香)、(E)-

2-戊烯醛(果香、柑橘香)、2-甲基丁醛(坚果香、霉味)、3-甲基丁醛(坚果香、霉味)、正丁醛、正己醛(青草香、油脂香)、辛醛(花果香、油脂香)、(E)-2-庚烯醛(油脂香)、n-壬醛(油脂香)^[22],

其中(*E*)-2-己烯醛在6种VOO中含量均较高,在LX、FO、KLD、HH中的含量相对高于PXL和EZ8中的,可作为VOO的风味特征成分之一,正己醛在FO中的含量较高(见图3)。其次,6种VOO中种类相对丰富的物质为酮类,其来源主要为酯类物质的分解或醇类物质的氧化^[23],6种VOO中共检出5种酮类化合物,分别为丙酮(花果香)、2-丁酮、2-己酮(花果香)、3-戊酮(果香)、1-戊烯-3-酮(香辣、醚香),其中2-己酮在PXL和EZ8中的含量较高,丙酮在KLD、EZ8和HH中的含量较高,而1-戊烯-3-酮在FO和EZ8中的含量较少,在其他品种VOO中的含量相对较多(见图3)。酯类物质主要为醇类和脂肪酸发生酯化反应生成。6种VOO中共检出3种酯类化合物,主要有乙酸乙酯(果香味)、(*Z*)-3-己烯乙酸酯和乙酸甲酯(果香)。醇类物质主要通过脂肪酶催化羰基化合物还原形成,能贡献微弱清香气味。6种VOO中共检出3种醇类化合物,分别为乙醇(酒精香)、正丙醇、正戊醇(果香),其中乙醇在PXL中的含量相对于其他5种VOO中的较少(见图3)。6种VOO中共检出1种萜烯类化合物,为 α -松油烯(木香、柠檬香)。6种VOO中共检出1种呋喃类化合物,为2-正戊基呋喃(果香味、甜味)。

2.3 不同品种VOO风味特征成分的PCA

采用Dynamic PCA插件制作VOO风味特征成分的PCA图,如图4所示。

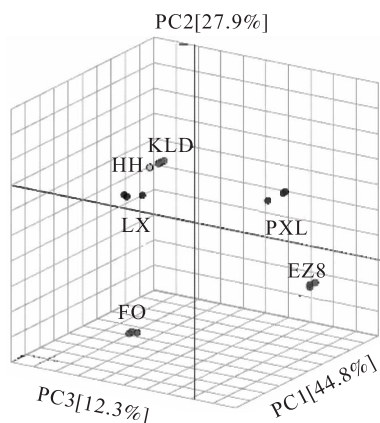


图4 不同品种VOO风味特征成分的PCA图

由图4可知,主成分1(PC1)、主成分2(PC2)和主成分3(PC3)的方差贡献率分别为44.8%、27.9%和12.3%,累积方差贡献率为85.0%,大于可信值60%,说明这3个主成分能够反映不同品种VOO样品风味特征成分信息。同一样品组内呈现相互聚集,说明本次数据重复度好,数据结果准确,而6种VOO组间呈现相对分散状,说明6种VOO

中风味特征成分均存在不同程度的差异。其中,LX、KLD和HH3种VOO分布比较接近,说明这3种VOO中风味特征物质较为相似,但仍存在一定差异;而FO、PXL和EZ8的VOO分布两两之间以及与另外3种(LX、KLD和HH)VOO间的距离均较远,说明FO、PXL和EZ8三者之间及与LX、KLD和HH之间均含有差异风味特征成分。该结果与指纹图谱分析结果一致。

3 结论

本研究采用HS-GC-IMS技术分析了产自甘肃陇南的LX、FO、KLD、PXL、EZ85个单品种和1个混合品种(HH)VOO中的风味特征成分,并将其进行定性和差异分析。结果表明,6种VOO中共检测出39种风味特征物质,定性出22种,其中醛类(9种)、酮类(5种)化合物为主要的风味特征成分,此外还包括酯类(3种)、醇类(3种)、萜烯类(1种)和呋喃类(1种)等物质。

6种VOO中含有的风味特征成分均存在不同程度的差异。LX、KLD和HH的风味特征成分较相似,主要有2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、(*E*)-2-戊烯醛、辛醛和2-正戊基呋喃等。正戊醇、正己醛和3-戊酮在FO中的含量较高。(*Z*)-3-己烯乙酸酯、 α -松油烯、2-己酮在PXL中的含量最高。EZ8中的风味特征成分主要为乙酸乙酯。2-丁酮、丙酮和(*E*)-2-庚烯醛在HH中的含量较高。以上定性出的风味特征物质可作为区分6种VOO的依据之一,但是由于GC-IMS内置数据库还未完善,还有部分物质未定性,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] CENTRONE M, D'AGOSTINO M, DIFONZO G, et al. Antioxidant efficacy of olive by-product extracts in human colon HCT8 cells[J/OL]. *Foods*, 2020, 10(1): 11 [2022-10-04]. <https://doi.org/10.3390/foods10010011>.
- [2] 石均华,王红芳,李泰安.甘肃武都油橄榄产业发展现状及对策[J]. *林业科技通讯*, 2021(10): 39-41.
- [3] BALAMASH K S, ALKREATHY H M, AL GAHDALI E H, et al. Comparative biochemical and histopathological studies on the efficacy of metformin and virgin olive oil against streptozotocin-induced diabetes in sprague-dawley rats [J/OL]. *J Diabetes Res*, 2018, 2018: 4692197 [2022-10-04]. <https://doi.org/10.1155/2018/4692197>.
- [4] NARDI G M, FAIS S, CASU C, et al. Mouthwash based on ozonated olive oil in caries prevention: A preliminary *in-vitro* study[J/OL]. *Int J Environ*, 2020, 17(23): 9106 [2022-10-04]. <https://doi.org/10.3390/>

- ijerph17239106.
- [5] KALUA C M, ALLEN M S, BEDGOOD D R, et al. Olive oil volatile compounds, flavour development and quality: A critical review [J]. *Food Chem*, 2007, 100 (1): 273 – 286.
- [6] CECCHI T, ALFEI B. Volatile profiles of Italian monovarietal extra virgin olive oils via HS – SPME – GC – MS: Newly identified compounds, flavors molecular markers, and terpenic profile [J]. *Food Chem*, 2013, 141 (3): 2025 – 2035.
- [7] 邓龙, 刘雄飞, 刘贤标, 等. GC – MS – O 结合电子鼻对橄榄油挥发性成分的分析与鉴别[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(5): 276 – 286.
- [8] KESEN S, KELEBEK H, SEN K, et al. GC – MS – olfactometric characterization of the key aroma compounds in Turkish olive oils by application of the aroma extract dilution analysis[J]. *Food Res Int*, 2013, 54(2): 1987 – 1994.
- [9] KAFLEG K, KHOT L R, SANKARAN S, et al. State of ion mobility spectrometry and applications in agriculture: A review[J]. *Eng Agric Environ Food*, 2016, 9(4): 346 – 357.
- [10] GERHARDT N, BIRKENMEIER M, SANDERS D, et al. Resolution – optimized headspace gas chromatography – ion mobility spectrometry (HS – GC – IMS) for non – targeted olive oil profiling [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2017, 409(16): 3933 – 3942.
- [11] CONTRERAS M D M, JURADO – CAMPOS N, ARCE L, et al. A robustness study of calibration models for olive oil classification: Targeted and non – targeted fingerprint approaches based on GC – IMS[J]. *Food Chem*, 2019, 288: 315 – 324.
- [12] ZHANG K, ZHANG C, GAO L, et al. Analysis of volatile flavor compounds of green wheat under different treatments by GC – MS and GC – IMS [J/OL]. *J Food Biochem*, 2022, 46 (6): e13875 [2022 – 10 – 04]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13875>.
- [13] CHEN T, CHEN X, LU D, et al. Detection of adulteration in canola oil by using GC – IMS and chemometric analysis [J/OL]. *Int J Anal Chem*, 2018, 2018: 3160265 [2022 – 10 – 04]. <https://doi.org/10.1155/2018/3160265>.
- [14] HE W, REN F, WANG Y, et al. Application of GC – IMS in detection of food flavor substances [J/OL]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2020, 545 (1): 012030 [2022 – 10 – 04]. [https://doi.org/10.1088/1755 – 1315/545/1/012030](https://doi.org/10.1088/1755-1315/545/1/012030).
- [15] GARRIDO – DELGADO R, DOBAO – PRIETO M D E L M, ARCE L, et al. Determination of volatile compounds by GC – IMS to assign the quality of virgin olive oil [J]. *Food Chem*, 2015, 187: 572 – 579.
- [16] 崔保威, 欧阳远鑫, 马杨柳, 等. 不同产地秀丽白虾干风味物质 GC – IMS 指纹图谱分析 [J]. *食品工业*, 2022, 43(7): 311 – 315.
- [17] 金文刚, 赵萍, 姜鹏飞, 等. 基于 GC – IMS 技术结合多元统计模型分析不同色泽小米粥挥发性有机物差异 [J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 277 – 284.
- [18] 周晨曦, 郑福平, 孙宝国. 离子迁移谱技术在食品风味分析中的应用研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(18): 309 – 318.
- [19] ZHANG X, DAI Z, FAN X, et al. A study on volatile metabolites screening by HS – SPME – GC – MS and HS – GC – IMS for discrimination and characterization of white and yellowed rice [J]. *Cereal Chem*, 2020, 97(2): 496 – 504.
- [20] 赵玉, 张玉环, 李建科, 等. GC – O 结合 OAV 鉴定陇南初榨橄榄油关键香气成分 [J]. *食品科学*, 2022, 43 (8): 184 – 189.
- [21] 雷春妮, 周小平, 高黎红, 等. 热脱附 – 气相色谱/质谱联用分析初榨橄榄油挥发性风味成分 [J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(2): 130 – 136, 146.
- [22] 谭艳, 王国庆, 吴锦铸, 等. 基于 GC – MS 与 GC – IMS 技术对四种柚皮精油挥发性风味物质的检测 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 256 – 268.
- [23] SUN J, SUN B, RREN F, et al. Characterization of key odorants in Hanyuan and Hancheng fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(23): 6403 – 6411.