

“煎炸食品品质调控及关键风险因子” 特约专栏文章之四

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.01.004

徐立荣, 常佳睿, 梅雪, 等. 不同煎炸阶段薯条和煎炸油中关键风味成分分析[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(1): 28-38.

XU L R, CHANG J R, MEI X, et al. Analysis of key flavor components in french fries and frying oil at different frying stages[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(1): 28-38.

不同煎炸阶段薯条和煎炸油中 关键风味成分分析

徐立荣, 常佳睿, 梅雪, 朱晨菲, 吴港城, 张晖, 金青哲, 王兴国✉

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 风味是薯条受欢迎程度的决定性感官特征。煎炸油一旦加热, 油脂的变化会直接影响食物的风味。在高油酸菜籽油 (RO) 煎炸过程中, 煎炸薯条 (FF) 的风味发展表现出三个明显的阶段, 包括诱导阶段 (总极性化合物 (TPC) 的含量为 3.0%~8.0%)、最佳阶段 (TPC 的含量为 8.0%~20%) 和降解阶段 (TPC 的含量为 22%以上)。为了区分各阶段的关键香气化合物, 选择了极性化合物为 3.0% (FF1)、10.5% (FF2) 和 27% (FF3) 的高油酸菜籽油制备的薯条及其相关油 (RO1、RO2、RO3) 进行感官分析。结果表明, FF1 中, (E,E)-2,4-癸二醛 (油炸气味) 含量较低, 这可能是 FF1 样品感官评分较低的原因。与 FF1 和 FF2 相比, FF3 具有较高的己酸 (汗臭味)、庚酸、壬酸、苯乙醛和反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛 (金属气味), 导致 FF3 的风味恶化。此外, FF3 中 2,5-二甲基吡嗪和 2-乙基-6-甲基-吡嗪的减少导致了较低的烘焙风味, 可能使得感官评分下降。同样, RO3 中(E)-2-十一烯醛、己酸、庚酸和壬酸含量较高, 其酸败评分增加, 从而降低感官评分。当 TPC 含量超过 22%时, 油的过氧化作用会引起酸败味, 因此煎炸后期应加以控制, 通过研究煎炸过程中关键风味物质的变化, 对开发具有最佳风味的油炸产品有借鉴意义。

关键词: 薯条; 煎炸油; 煎炸阶段; 理代性质; 总体香气评价; 香气活性化合物; 气味活性阈值

中图分类号: TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2022)01-0028-11

网络首发时间: 2022-01-07 15:42:56

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220107.1315.012.html>

Analysis of Key Flavor Components in French Fries and Frying Oil at Different Frying Stages

XU Li-rong, CHANG Jia-rui, MEI Xue, ZHU Chen-fei, WU Gang-cheng,
ZHANG Hui, JIN Qing-zhe, WANG Xing-guo✉

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: The flavor is a decisive sensory characteristic that determines the popularity of French fries (FFs).

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 国家食品科学技术一级学科计划 (JU FSTR20180202); 江苏省研究生研究与实践创新计划 (KYCX20_1852); 国家自然科学基金 (3191728); 江苏省博士后科研基金计划项目 (2020Z297)

Supported by: National First-Class Discipline Program of Food Science and Technology (No.JUFSTR20180202); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX20_1852); National Natural Science Foundation of China (No.31901728); Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (No.2020Z297).

作者简介: 徐立荣, 女, 1991 年出生, 博士, 研究方向为油脂加工与营养安全。E-mail: 15877484825@163.com.

通讯作者: 王兴国, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 研究方向为油脂加工与营养安全。E-mail: wxg1002@qq.com.

During high-oleic rapeseed oil (RO) frying, the flavor development of FFs showed three noticeable stages including break-in (3%-8.0% of total polar compounds (TPC)), optimum (8.0%-20% of TPC), and degrading stages (above 22% of TPC). In order to distinguish the key aroma compounds in each stage, the FFs prepared in RO at TPC of 3% (FF1), 10.5% (FF2), and 27% (FF3) and their relevant oils (RO1, RO2, RO3) were selected for sensory-directed analysis. The results revealed that the FF1 had low contents of (E,E)-2,4-decadienal (deep-fried odor) which could be the reason why FF1 samples were rated with low-sensory score. The FF3 had higher hexanoic acid (sweaty odor), heptanoic acid, nonanoic acid, benzene acetaldehyde (stale odor), and trans-4,5-Epoxy-(E)-2-decenal (metallic odor) compared with FF1 and FF2, which resulted in flavor deterioration in FF3. Moreover, the decrease of 2,5-dimethylpyrazine and 2-ethyl-6-methyl-pyrazine in FF3 induced the lower roast flavor, which may also lead to the decline of the sensory score. Similarly, the higher portion of (E)-2-undecenal, hexanoic acid, heptanoic acid, and nonanoic acid in RO3 leads to increase in its rancid score and thus lower the sensory score. When the TPC content exceeded 22%, the peroxidation of the oil could cause the rancid taste. Therefore, it should be controlled in the later stage of frying. By understanding the changes of key flavor substances during the frying process, it can be significantly used as a reference for the development of fried products with the best flavor.

Key words: French fries; frying oil; frying stages; physicochemical; overall aroma evaluation; aroma-active compounds; odor activity value

煎炸是一种流行、快速的烹饪方法，几十年来一直在国内和商业上使用以提高食品的感官质量^[1]。煎炸食品的风味是最终决定煎炸食品接受程度的基础，也是决定性的感官特征之一^[2]。从实用性和经济效益的角度来看，煎炸油在家庭厨房、餐馆和餐饮业中得到了持续的应用。而油一旦被加热，油脂就开始改变。最终，油脂的变化会直接影响食品的感官特性和风味^[3]。在煎炸过程中一些化学反应（例如热氧化、水解和聚合反应）发生，其中涉及三酰甘油、多糖和蛋白质的复杂变化，这些反应可以诱导产生挥发性物质，并决定油炸产品的感官特性。在这些反应中，脂质氧化起着主要作用，氧化产生的氢过氧化物最终分解成风味化合物（如醛、酮和醇）从而决定煎炸食品的风味^[4]。因此，为了获得高质量的煎炸食品，了解煎炸过程中的油脂降解现象和油脂对煎炸食品的影响是至关重要的。

Blumenthal 进行的研究提出了“煎炸油质量曲线”（以五个阶段表示的油脂变化：诱导、新鲜、最佳、降解和废弃阶段），以解释油裂变与食品质量之间的相互关系。第一阶段制备的煎炸产品是生的，颜色和气味都很淡^[5]；随着油的进一步降解，煎炸过程进入了“新鲜”和“最佳”阶段，食品质量改善，出现了金黄色和理想的风

味；最后，油继续降解，进入“降解”和“废弃”阶段。在最后阶段，煎炸油的长期使用导致脂质氧化过度，使得感官评分较低。

然而，质量曲线是基于煎炸食品的感官评价所得，目前尚不清楚哪些理想和异味化合物在诱导、最佳和降解阶段控制不同的风味评分，香气化合物的详细定量信息仍有待进一步研究。许多研究评估了油类型对薯条风味的影响^[6-7]，然而，只有少数研究评估油的降解对薯条风味化合物的影响，其中一项研究是由 Enriquez-Fernandez 等发起的，研究了油类型和新鲜度对薯条感官特性的影响，但仍不确定是哪几种挥发性化合物引起的变化^[8]。此外，Santos 等的研究比较了 3 种商品油在煎炸过程中对土豆感官质量的影响^[9]，该研究粗略地表明了马铃薯的挥发性化合物的特征，但忽略了关键香气活性化合物的变化。

在最近的研究中，分子感官科学被用于全面分析油和其他食品基质中的关键香气活性化合物^[10-11]。因此，本研究的目的是利用分子感官科学分析，对煎炸薯条和高油菜籽油中关键气味活性风味化合物在诱导、最佳和降解阶段的定量信息进行表征和比较。本研究的结果将有助于控制煎炸食品的异味形成，改善煎炸食品的香气。还可为食品工业的风味控制和标准化提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

新鲜马铃薯(茄薯 L, 贺兰 15 品种): 山东某农场; 高油酸菜籽油, 存放于 4 °C 下, 无添加剂: 嘉吉粮油公司; 异辛烷、甲醇、正己烷为色谱纯, 其余试剂均为分析纯: 国药控股集团化学试剂有限公司; 挥发性化合物标准品: 西格玛试剂公司。

1.2 仪器与设备

Aigoli, 最大容量为 2.5 L 的商用油炸锅: 中国; 固相微萃取装置、纤维萃取头 (50/30 μm) DVB/CAR/PDMS 萃取头: 美国色谱科公司; Trace 1300 ISQ 气相色谱质谱联用仪 (GC-MS): 美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 实验方法

1.3.1 煎炸实验

高油酸菜籽油加热到 (150 $\pm$ 2) °C, 每批次 (100 $\pm$ 2) g 土豆下锅炸 5 min, 55 min 后进行下一个批次, 总体煎炸时间为 4 d; (8 h/d), 29 h 后总极性组分超过 27%。因此, 每批次煎炸结束后收集薯条和煎炸油, 以供进一步分析。

1.3.2 脂肪酸分析

根据 Li 等报道的方法, 以十九烷酸甲酯为内标测定脂肪酸组成^[12]。用 Agilent7820 对脂肪酸组成进行了气相色谱分析, 具体测定参数参考本课题组之前的研究^[13]。

脂肪酸甲酯的制备: 取 50.0 mg 待测油样于 5 mL 离心管中, 加入 1.0 mL 色谱纯正己烷使其溶解均匀; 然后加入 0.5 mL 2 mol/L 的氢氧化钾-甲醇溶液, 并在漩涡震荡仪上震荡 30 s; 取上清液, 转移至另一离心管, 加入少量无水硫酸钠, 离心后取上清液, 过 0.22 μm 滤膜, 待检测。

气相色谱分析条件: 进样口温度: 250 °C; 分流比: 100 : 1; 进样量: 1 μL ; 载气: 高纯氮气 (99.99%); 载气流速: 20 mL/min, 恒流模式; 检测器温度: 250 °C。程序升温过程: 在 60 °C 保持 3 min; 然后以 5 °C/min 升温至 150 °C 并保持 15 min; 最后以 2 °C/min 升温至 220 °C 并保持 10 min。脂肪酸采用内标相对定量。

1.3.3 酸值、茴香胺值和总极性组分测定

酸价、茴香胺值和总极性组分的检测分别按

照国家标准 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》、GB/T 24304—2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》和国标 GB 5009.202—2016《食品安全国家标准 食用油中极性组分 (PC) 的测定》制备型快速柱层析法执行。

1.3.4 测定薯条的水分和总油含量及颜色

采用烘箱干燥法测定样品的含水率^[14], 用索氏提取法测定薯条样品的含油量^[15]。

1.3.5 感官评定

由 80 名感官小组成员 (65% 为女性; 18~40 岁, 来自江南大学) 对薯条样品进行了消费者喜好评价, 从 1 (极不喜欢的风味) 到 7 分 (极喜欢的风味), 小组成员按照国家标准方法 GB/T 16291.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则 第 1 部分: 优选评价员》进行了培训。

过程: 将薯条放在纸杯中, 用 3 位随机数字标记, 并提交给每个评估人员。来自江南大学的 12 名受过训练的小组成员评估高油酸菜籽油和薯条的感官属性。在分析之前, 通过描述性测试选择了几种香气品质, 参考 Thurer 等的研究^[7]。选定的气味属性的强度绿色/草状、金属、油炸、脂肪、汗味、腐臭的味道用来描述高油酸菜籽油和煮熟的土豆、烘烤、焦糖、油炸、脂肪、陈腐、金属和陈腐味用来描述薯条, 感官专家按线性尺度从 0 (不可感知) 到 3 分 (强烈可感知) 打分, 每个样本由每个小组成员评估三次。

1.3.6 气相色谱法-嗅觉质谱法 (GC-O-MS) 对香气提取物进行稀释分析

采用 GC-MS 结合嗅觉端口对样品进行分析。在 DB-WAX 柱上 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 25 μm) 进行 GC-O 分析, 实验条件与 GC-MS 测定挥发性物质一致, 将 GC 入口分离比从 4 : 1 提高到 16 : 1、64 : 1、256 : 1, 对样品进行稀释。风味稀释 (FD) 因子被定义为可检测香气化合物的最大稀释度。

1.3.7 香气活性化合物的定量和气味活性值的计算

SPME 方法参考 Santos 等^[9]进行的研究, 并在此基础上作少量修改。气味活性化合物通过外部标准方法与质谱定量, 并在选定的离子监测模式下检测。在定量分析之前依照该研究中所述方法做少量修改^[16], 对薯条进行了进一步的处理以

获得一种人工无味基质, 通过分子蒸馏得到无味的精制菜籽油, 气味活度值 (OAVs) 被计算为每种气味的浓度与其各自在油中的阈值的比值, 阈值是从先前的研究中得到的^[17]。

1.4 数据分析

所有分析均进行三次平行。使用 SPSS statistics 22 软件进行了单因素方差分析和多重比较。

2 结果和分析

2.1 理化分析

2.1.1 煎炸油的脂肪酸组成

煎炸过程中高油酸菜籽油的脂肪酸组成变化见表 1。在新鲜高油酸菜籽油中主要的脂肪酸为油酸 (72.79 g/100 g), 脂质的氧化敏感性与其脂肪酸组成有关, 导致不同的挥发性化合物从脂肪酸中降解^[18]。在煎炸过程中, 油酸从 72.79 下降到 59.94 g/100 g。同时, 多不饱和脂肪酸的降解随着煎炸时间的延长而增加, 具体表现为从 17.49 下降到 11.17 g/100 g。此外, 高油酸菜籽油中亚油酸和亚麻酸的含量也降低。在煎炸过程结束时, 高油酸菜籽油中, 亚油酸和亚麻酸分别减少 4.34 和 1.89 g/100 g。饱和脂肪酸也随煎炸时间 (8.25~6.66 g/100 g) 呈下降趋势。这些结果与先前对 Liu 等的研究一致^[18]。另外, 反式脂肪酸是油热降解的常见指标。随着煎炸时间的延长, 高油酸菜籽油中的反式脂肪酸增加, 从 0.23 增加到 0.31 g/100 g。这与大豆油和橄榄油在煎炸 28 h 期间的增加趋势是一致的^[19]。

2.1.2 煎炸油的酸值、茴香胺值和总极性组分的变化

不同煎炸时间高油酸菜籽油的酸值、茴香胺值和总极性组分的变化如表 2 所示, 在高油酸菜籽油中, 随着煎炸时间的推移, 酸值迅速增加, 在煎炸 29 h 后达到 4.80 mg/g。茴香胺值表示二次氧化的程度。鲜新油中茴香胺值含量较低 (3.00), 深度煎炸 8 h 后急剧增加到 111.14。然后, 该值呈现缓慢增长趋势由 121.00 到 156.18, 直到煎炸时间结束。总极性组分的含量是煎炸过程中最具代表性的指标之一, 它描述了煎炸油的变质程度。根据中国国家标准, 当总极性组分超过 27% 时, 煎炸油应丢弃^[13]。在长时间的煎炸过程中, 高油酸菜

籽油的总极性组分含量逐渐增加, 在煎炸 29 h 时达到 27%。

2.1.3 薯条的水分、含油量变化

薯条在煎炸过程中的油和水分含量如表 3 所示。由表可知, 马铃薯油炸后水分显著降低 21%, 含油率从 0.11% 急剧上升到 30.58%。上升脂肪吸收率随着水分的减少而降低, 最终油含率从 29.17% 到 33.14% 不等。然而, 这些结果随煎炸时间的变化而变化。先前的研究证实, 煎炸过程中表面活性剂的形成影响了传热和传质的速率^[20]。这些表面活性剂所涉及的变化可能会导致土豆煎炸过程中油含量的波动。

2.2 长期煎炸对薯条感官评价的影响

油脂的变化会直接影响食品的风味, 总极性组分是响应煎炸油氧化程度的重要指标, 因此, 油中总极性组分的浓度与煎炸食品的风味质量有关。图 1 显示了薯条的风味感官得分与煎炸油的总极性组分浓度的关系。第一批薯条的风味评分和第 1 h 时候煎炸的薯条的风味评分均低于 2~3 h 煎炸。在煎炸过程开始时, 薯条的风味不是最佳的。新鲜油的风味通常是平淡的, 需要经过适度的氧化来为消费者开发理想的煎炸风味。在本研究中, 煎炸油在 150 °C 下加热 1 至 4 h 作为诱导期是足够的, 在此期间总极性组分含量为 3.5%~8.0%。煎炸 5~20 h, 所制备的薯条的风味评分高于诱导期制备的风味评分, 此期间总极性组分浓度从 8% 提高到 20%。在此期间, 薯条具有最佳的煎炸风味。随着总极性组分含量在 22 h 后增加到 22%, 薯条的风味评分下降到 5.4 分。因此, 当总极性组分在 22% 以上时, 应控制煎炸油, 以延长最佳阶段。然而, 薯条的风味发展表现出三个明显的阶段, 即诱导、最佳和降解阶段。在煎炸的新鲜阶段, 风味得到了改善, 随后, 进入最佳阶段, 风味评分较高, 在最佳阶段几乎保持不变。在降解阶段逐渐变得不易接受。为了获得各阶段的关键香气化合物, 选择了总极性组分在 0.05、10 和 29 h 分别为 3%、10.5% 和 27% 的高油酸菜籽油中制备的薯条样品及其相关的煎炸油进行进一步分析。

2.3 总体香气评价

对总极性组分为 3% (RO1)、10.5% (RO2)、

表 1 不同煎炸时间的高油菜籽煎炸油脂肪酸成分的变化
Table 1 Changes of fatty acid composition of high rapeseed frying oil with different frying time

脂肪酸	煎炸时间/h													g/100 g
	新鲜油	0.05	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
C14:0	0.30±0.00 ^b	0.29±0.00 ^c	0.26±0.00 ^f	0.25±0.00 ^g	0.26±0.00 ^f	0.27±0.00 ^e	0.25±0.00 ^g	0.28±0.00 ^d	0.21±0.00 ^h	0.27±0.00 ^e	0.27±0.00 ^e	0.55±0.00 ^a	0.25±0.00 ^g	
C16:0	4.40±0.02 ^a	4.37±0.03 ^a	4.31±0.03 ^b	4.22±0.03 ^b	4.14±0.03 ^d	4.10±0.03 ^d	4.03±0.04 ^e	3.99±0.01 ^f	3.94±0.01 ^g	3.89±0.01 ^h	3.88±0.02 ^{hi}	3.87±0.01 ⁱ	3.87±0.01 ⁱ	
C16:1	0.38±0.00 ^a	0.37±0.00 ^b	0.36±0.00 ^c	0.33±0.00 ^d	0.32±0.00 ^e	0.32±0.00 ^e	0.31±0.00 ^f	0.31±0.00 ^f	0.30±0.00 ^g	0.30±0.00 ^g	0.30±0.00 ^g	0.29±0.00 ^h	0.29±0.00 ^h	
C18:0	2.46±0.01 ^a	2.01±0.01 ^b	1.93±0.01 ^c	1.87±0.01 ^d	1.80±0.01 ^e	1.76±0.01 ^f	1.74±0.01 ^{fg}	1.72±0.01 ^g	1.71±0.01 ^{gh}	1.71±0.01 ^{gh}	1.70±0.01 ^{gh}	1.69±0.01 ^h	1.57±0.01 ⁱ	
C18:1 n9 C	72.79±0.36 ^a	72.36±0.36 ^a	71.36±0.36 ^b	69.99±0.35 ^{bc}	68.56±0.34 ^c	66.14±0.26 ^d	65.06±0.33 ^e	63.49±0.25 ^f	63.24±0.25 ^f	61.02±0.24 ^g	60.80±0.36 ^{gh}	60.42±0.30 ^h	59.94±0.24 ⁱ	
C18:1 n11 C	2.79±0.01 ^a	2.70±0.01 ^b	2.44±0.02 ^c	2.29±0.01 ^d	2.28±0.01 ^d	2.24±0.01 ^e	2.15±0.01 ^g	2.14±0.01 ^{gh}	2.18±0.01 ^f	2.12±0.01 ^h	2.10±0.01 ^h	2.10±0.01 ^h	2.00±0.01 ⁱ	
C18:2 n6 T	0.13±0.00 ^d	0.13±0.00 ^d	0.14±0.00 ^c	0.14±0.00 ^c	0.13±0.00 ^d	0.14±0.00 ^e	0.15±0.00 ^b	0.15±0.00 ^b	0.15±0.00 ^b	0.15±0.00 ^b	0.16±0.00 ^a	0.16±0.00 ^a	0.16±0.00 ^a	
C18:2 n6 C	14.39±0.07 ^a	14.52±0.12 ^a	14.50±0.10 ^a	14.47±0.09 ^a	13.89±0.07 ^b	12.92±0.05 ^e	12.12±0.06 ^d	11.42±0.05 ^e	11.00±0.04 ^f	10.20±0.04 ^g	10.15±0.06 ^{gh}	10.10±0.05 ^h	10.05±0.04 ^h	
C18:3 n6	0.21±0.00 ^a	0.20±0.00 ^b	0.17±0.00 ^c	0.15±0.00 ^d	0.15±0.00 ^d	0.15±0.00 ^d	0.15±0.00 ^d	0.14±0.00 ^e	0.14±0.00 ^e	0.13±0.00 ^f	0.13±0.00 ^f	0.13±0.00 ^f	0.12±0.00 ^g	
C18:3 n3T	0.10±0.00 ^f	0.11±0.00 ^e	0.12±0.00 ^d	0.13±0.00 ^c	0.12±0.00 ^d	0.13±0.00 ^c	0.13±0.00 ^c	0.13±0.00 ^c	0.13±0.00 ^c	0.13±0.00 ^c	0.14±0.00 ^b	0.14±0.00 ^b	0.15±0.00 ^a	
C18:3 n3	2.89±0.01 ^a	2.86±0.02 ^a	2.70±0.02 ^b	1.89±0.01 ^c	1.72±0.01 ^d	1.58±0.01 ^e	1.36±0.01 ^f	1.29±0.01 ^g	1.18±0.00 ^h	1.06±0.00 ⁱ	1.05±0.01 ⁱ	1.05±0.01 ⁱ	1.00±0.00 ^j	
C20:0	0.78±0.00 ^a	0.76±0.01 ^b	0.72±0.01 ^c	0.70±0.00 ^d	0.66±0.00 ^e	0.64±0.00 ^f	0.59±0.00 ^k	0.63±0.00 ^g	0.60±0.00 ^j	0.62±0.00 ^h	0.61±0.00 ^j	0.62±0.00 ^h	0.61±0.00 ^j	
C20:1	1.44±0.01 ^{ab}	1.45±0.01 ^a	1.43±0.01 ^{ab}	1.42±0.01 ^b	1.37±0.01 ^c	1.35±0.01 ^c	1.25±0.01 ^e	1.30±0.01 ^d	1.27±0.01 ^e	1.26±0.01 ^e	1.26±0.01 ^e	1.26±0.01 ^e	1.25±0.01 ^e	
C22:0	0.31±0.00 ^b	0.33±0.00 ^g	0.34±0.00 ^f	0.34±0.00 ^f	0.36±0.00 ^d	0.38±0.00 ^b	0.35±0.00 ^e	0.39±0.00 ^a	0.36±0.00 ^d	0.38±0.00 ^b	0.38±0.00 ^b	0.37±0.00 ^e	0.37±0.00 ^e	
ΣTFA	0.23±0.00 ⁱ	0.24±0.00 ^h	0.26±0.00 ^f	0.27±0.00 ^e	0.25±0.00 ^g	0.27±0.00 ^e	0.28±0.00 ^d	0.28±0.00 ^d	0.28±0.00 ^d	0.28±0.00 ^d	0.29±0.00 ^c	0.30±0.00 ^b	0.31±0.00 ^a	
ΣSFA	8.25±0.04 ^a	7.76±0.06 ^b	7.55±0.05 ^c	7.37±0.04 ^d	7.21±0.04 ^e	7.14±0.03 ^f	6.95±0.03 ^g	6.99±0.03 ^g	6.81±0.03 ^h	6.85±0.03 ^h	6.83±0.04 ^h	7.10±0.04 ⁱ	6.66±0.03 ^j	
ΣMUFA	77.40±0.39 ^a	76.87±0.61 ^a	75.58±0.53 ^b	74.03±0.44 ^c	72.53±0.36 ^d	70.06±0.28 ^e	68.78±0.34 ^f	67.24±0.27 ^g	66.99±0.27 ^h	64.70±0.26 ⁱ	64.45±0.39 ^{ji}	64.07±0.32 ^j	63.48±0.25 ^k	
ΣPUFA	17.49±0.09 ^a	17.58±0.14 ^a	17.37±0.12 ^a	16.51±0.10 ^b	15.76±0.08 ^c	14.65±0.06 ^d	13.64±0.07 ^e	12.86±0.05 ^f	12.32±0.05 ^g	11.39±0.05 ^{gh}	11.33±0.07 ^{gh}	11.28±0.06 ^{gh}	11.17±0.04 ^h	

注：值用平均值±SD 表示；同一行中具有不同字母的数据在 $P<0.05$ 时有显著差异。ΣTFA：反式脂肪酸总量；ΣMUFA：单不饱和脂肪酸的总量；ΣSFA：饱和脂肪酸总量；ΣPUFA：多不饱和脂肪酸的总量。

Note: Values represent the means ± SD; Data within the same row with different letters are significantly different at $P < 0.05$. ΣTFA: total amount of trans fatty acid; ΣSFA: total amount of saturated fatty acid; ΣMUFA: total amount of monounsaturated fatty acid; ΣPUFA: total amount of polyunsaturated fatty acid.

表2 不同煎炸时间高油菜籽油的酸值、茴香胺值和总极性组分的变化

Table 2 Changes of acid value, anisidine value and total polar components of high rapeseed oil at different frying times

煎炸时间/h	酸值/(mg/g)	茴香胺值	总极性组分/%
0.05	0.25±0.03 ^p	3.00±0.23 ⁿ	3.00±0.32 ^q
1	0.30±0.06 ^p	7.00±0.16 ^m	3.50±0.14 ^p
2	0.42±0.07 ^o	16.00±0.65 ^l	5.00±0.23 ^o
4	0.60±0.05 ⁿ	67.24±0.84 ^k	8.00±0.36 ⁿ
6	1.00±0.05 ^m	70.00±1.03 ^j	8.90±0.16 ^m
8	1.70±0.03 ^l	111.14±2.03 ⁱ	9.60±0.34 ^l
10	2.00±0.06 ^k	121.00±1.01 ^h	10.50±0.45 ^k
12	2.70±0.03 ^j	123.58±2.01 ^h	11.50±0.33 ^j
14	3.00±0.02 ⁱ	128.00±1.06 ^g	14.00±0.37 ⁱ
16	3.14±0.02 ^h	130.78±1.05 ^f	15.60±0.33 ^h
18	3.30±0.03 ^g	132.00±1.33 ^f	18.50±0.46 ^g
20	3.65±0.08 ^f	136.27±1.13 ^e	20.00±0.25 ^f
22	3.90±0.08 ^e	138.00±1.33 ^d	22.00±0.23 ^e
24	4.10±0.03 ^d	142.00±1.13 ^c	23.00±0.23 ^d
26	4.50±0.03 ^c	148.63±1.33 ^b	24.00±0.25 ^c
28	4.70±0.04 ^b	150.00±1.05 ^b	26.00±0.14 ^b
29	4.80±0.04 ^a	156.18±1.23 ^a	27.00±0.23 ^a

注: 值用平均值±SD表示; 同一列中具有不同字母的数据在 $P < 0.05$ 时有显著差异。

Note: Values represent the means ± SD; Data within the same column with different letters are significantly different at $P < 0.05$.

27% (RO3) 的高油酸菜籽油和在相关煎炸油中制备的薯条 (FF1、FF2、FF3) 的总体感官进行了评价。如图 2 (a)、(b) 所示, 在 RO1、RO2 和 RO3 样品中, 油炸和脂肪香气被强烈感知, RO2 与 RO1 和 RO3 相比具有更高的油炸气味。与 RO1 和 RO2 相比, RO3 样品表现出较高的汗臭和酸败气味, 从而导致了 RO3 的异味。在 FF1、FF2 和

表3 薯条生产过程中水分和油含量的变化

Table 3 Changes in moisture and oil content during the production of French fries

煎炸时间/h	含油率/(g/100 g, d. b.)	含水率/(g/100 g, w. b.)
生土豆	0.11±0.01 ^d	80.50±0.70 ^a
0.05	30.58±0.7 ^{bc}	59.50±0.58 ^c
2	30.35±0.34 ^c	58.06±0.64 ^d
4	29.17±0.92 ^c	65.26±0.24 ^b
6	31.30±0.34 ^b	56.70±0.51 ^e
8	31.10±0.34 ^b	54.26±0.64 ^f
10	30.90±0.34 ^{bc}	52.72±0.34 ^g
12	31.10±0.34 ^b	55.67±0.74 ^e
14	32.20±1.01 ^{ab}	52.64±0.24 ^g
18	32.35±1.34 ^{ab}	52.58±0.64 ^g
22	32.41±0.43 ^a	52.75±0.34 ^g
26	32.79±0.30 ^a	50.65±0.44 ^h
29	33.14±0.40 ^a	49.65±0.48 ⁱ

注: 值用平均值±SD表示, 同一列中具有不同字母的数据在 $P < 0.05$ 时有显著差异。

Note: Values represent the means ± SD. Data within the same column with different letters are significantly different at $P < 0.05$.

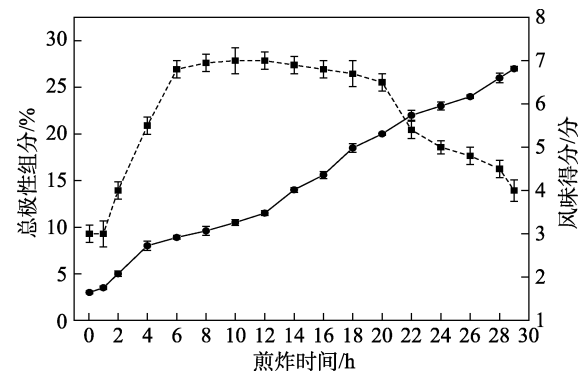


图1 不同批次薯条的风味评分与油中的总极性化合物之间的关系

Fig.1 The relationship between the flavor scores of different batches of French fries and the total polar compounds in the oil

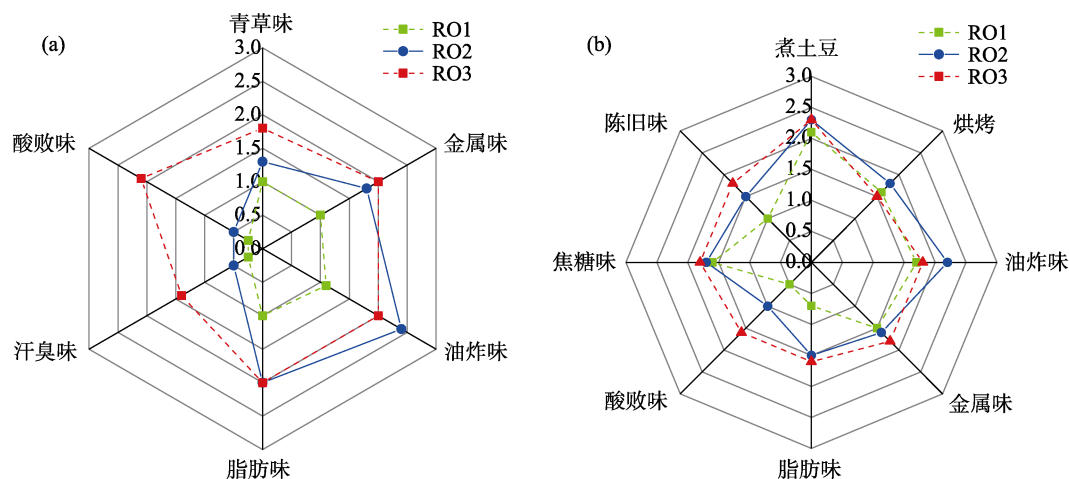


图2 RO1, RO2, RO3 (a) 和 FF1, FF2, FF3 (b) 的炸薯条的感官评价结果

Fig.2 Sensory evaluation results of French fries of RO1, RO2, RO3(a) and FF1, FF2, FF3(b)

FF3 样品中, 煮熟的土豆、烘烤、焦糖和油炸气味被很好地感知到, FF2 具有较高的油炸香气得分。然而, FF3 样品含有更强烈的脂肪、陈腐和酸败的气味, 这显著影响了薯条样品中的异味。感官评价表明, 油的深度氧化在高油酸菜籽油和薯条中产生了异味, 不仅通过增强脂肪、出汗和酸败的气味, 而且还通过减少煎炸的香味。

2.4 RO1、RO2、RO3、FF1、FF2 和 FF3 样品中香气活性化合物的鉴定

在高油酸菜籽油和薯条中共鉴定出 26 种和 34 种香气活性化合物 (表 4)。薯条的分类几乎与先前的一项研究相似, 该研究检测了棕榈油制备的薯条中的 43 种挥发性化合物^[21]。然而, 这些风味化合物的贡献是不同的, 其中醛显示出更高的 FD 值。一些饱和醛 (己醛、庚醛、辛醛)、烯醛 ((E)-2-辛烯醛、(E)-2-癸烯醛、(E)-2-十一烯醛) 和二烯醛 ((E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛) 是高油酸菜籽油的主要青草、脂肪、油炸和金属风味的贡献物质。与 RO1 相比, RO2 和 RO3 中的这些醛类物质的 FD 值相对较高。一些芳香活性化合物, 特别是酸只在 RO3 样品中检测到, 如己酸、庚酸和辛酸。而壬酸在 RO3 中的 FD 值 (64) 高于 RO1 和 RO2。因此, 这些新产生的酸可能导致汗臭和酸败的味道, 并导致 RO3 中较低的感官评分。对于薯条, 上述油氧化生成的二烯醛在薯条样品中比饱和醛和单烯醛具有更重要的风味贡献。此外, 2,5-二甲基吡嗪 (烤味)、3-(甲硫基)-丙醛 (薯土豆风味) 和 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮 (焦糖风味) 在薯条中具有较高的 FD 值 (≥ 64)。此外, 与 FF1 和 FF2 相比, FF3 中的己酸、庚酸、辛酸和壬酸具有较高的 FD 值, 从而导致酸败味。此外, 苯乙醛中 FD 值的增加具有陈腐/蜡气气味, 而 2,5-二甲基吡嗪和 2-乙基-6-甲基吡嗪中 FD 值的降低可能导致感官得分降低。

2.5 香气活性化合物的定量和气味活性值的计算

用外部标准方法对 GC-O-MS 鉴定的高油酸菜籽油和薯条中的重要香气活性化合物进行了定量分析, 计算了各自的 OAV。与其他化合物比, (E,E)-2,4-癸二烯醛和反式-4,5-环氧-(E)-2-癸二烯

醛及其 OAVs 的含量均较高 (表 5), 与 AEDA 的结果一致。然而, 与油炸气味有关的 (E,E)-2,4-癸二烯醛含量最高的是 RO2。同时, 随着油炸时间的延长, 其含量降低, 导致油炸风味下降。如先前一项研究所报告, 通过反 aldol 缩合反应, 2,4-癸二烯醛可降解为 2-辛醛和己醛^[22]。此外, 它还可以参与 Mallard 反应, 这可能导致 2,4-癸二烯醛的下降。(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛和 (E)-2-十一烯醛是高油酸菜籽油的重要化合物, 它们具有较高的相对峰面积^[23]。虽然 AEDA 的结果显示出较高的 FD 值, 但由于这些醛在油中的气味阈值相对较高, 因此在这些醛中没有获得更高的 OAV。饱和脂肪醛, 即, 己醛、辛醛和壬醛是典型的脂质氧化产物, 随着煎炸时间的延长, 它们在高油酸菜籽油中呈上升趋势, 因此 RO3 的含量和 OAV 最高。这些饱和的醛类在高含量时也会导致酸败味^[24]。如前所述, 饱和醛, 特别是己醛, 可以从 2,4-癸二烯醛中降解, 从而导致这些醛的增加^[22]。四种芳香活性酸类化合物 (己酸、庚酸、辛酸和壬酸) 的浓度和 OAV 在 RO3 中均高于其他两种样品, 其中壬酸的 OAV 最高 (34)。因此, 由于三种样品的浓度明显不同, 这四种酸可以被认为是高油酸菜籽油中产生汗味和酸败味的关键芳香化合物。

薯条中香气活性化合物的浓度和气味活性值如表 6 所示, 一些香气活性化合物, 例如, 3-甲硫基丙醛, 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪, 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮, 苯乙醛和 2-甲基丁醛是由美拉德反应产生的, 在三个薯条样品中存在高浓度和 OAV 值。这些化合物的高含量与先前研究的结果一致^[22,25]。其中, 与 FF1 和 FF2 相比, FF3 中苯乙醛的浓度和 OAV 最高。苯乙醛在低浓度下具有一定的青草味, 但在较高浓度下产生了陈旧/纸板气味^[26], 这引起了 FF3 中的陈腐气味。Zamora 等^[27]进行的研究报道了不饱和醛 (2,4-癸二烯醛、4,5-环氧-2-癸烯醛) 的脂质氧化可将苯丙氨酸降解为相应的 Strecker 醛, 即苯乙醛。因此, 我们可以推测, 这些不饱和醛可能会诱导更多的苯乙醛产生。此外, 对于醛的脂质氧化, FF2 中具有理想油炸气味的 (E,E)-2,4-癸二烯醛最高, 从而获得了较高的感官评分。饱和醛 (己醛、辛

醛和壬醛)的浓度和 OAV 随煎炸时间的增加而增加, FF3 与 FF1 和 FF2 相比, 这些饱和醛的浓度和 OAV 较高。它们的高浓度可能导致 FF3 具有

更高的脂肪和酸败味。此外, FF3 中的反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛表现出较高的浓度, 导致 FF3 中具有更多的金属气味。此外, 在 FF3 中己酸和

表4 薯条和煎炸油挥发性化合物的气味贡献

Table 4 Odor contribution of volatile compounds of French fries and frying oil

^a No.	物质	^b 保留指数	^c FD 值						^d 气味描述	^e 鉴定方式
			RO1	RO2	RO3	FF1	FF2	FF3		
1	2-甲基丁醛	831	ND	ND	ND	16	16	16	麦芽味	MS, RI, odor, S
2	己醛	1 087	4	16	64	0	4	4	草香、果香	MS, RI, odor, S
3	庚醛	1 182	4	16	64	4	4	4	柑橘类, 草香	MS, RI, odor, S
4	2-戊基呋喃	1 235	16	16	16	0	4	4	黄油、果味、绿豆	MS, RI, odor, S
5	辛醛	1 291	16	64	64	4	16	16	油腻	MS, RI, odor, S
6	1-辛烯-3-醇	1 304	ND	4	4	0	0	0	蘑菇味	MS, RI, odor, S
7	(E)-2-庚烯醛	1 323	4	16	16	4	4	4	油味、果味、草味	MS, RI, odor, S
8	2,5-二甲基吡嗪	1 340	ND	ND	ND	64	64	16	蒸米饭, 烤, 甜	MS, RI, odor, S
9	2-乙基-6-甲基-吡嗪	1 372	ND	ND	ND	4	4	0	蒸米饭, 烤, 甜	MS, RI, odor, S
10	壬醛	1 395	4	4	4	4	4	4	柑橘、牛油、花香	MS, RI, odor, S
11	2-乙基-3-甲基-吡嗪	1 402	ND	ND	ND	4	4	4	烤的, 甜的	MS, RI, odor, S
12	(E)-2-辛烯醛	1 426	16	64	64	4	16	4	绿色, 脂肪	MS, RI, odor, S
13	3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪	1 430	ND	ND	ND	16	16	16	坚果味, 烤香	MS, odor, S
14	2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪	1 436	ND	ND	ND	4	4	4	坚果味, 烤香	MS, RI, odor, S
15	3-(甲硫基)-丙醛	1 454	ND	ND	ND	256	256	256	煮土豆	MS, RI, odor, S
16	(E, E)-2,4-庚二烯醛	1 490	4	64	64	4	4	0	脂肪, 坚果, 油腻, 腐臭	MS, RI, odor, S
17	癸醛	1 497	0	4	4	0	0	0	脂肪, 花香, 绿色	MS, RI, odor, S
18	3-壬烯-2-酮	1 508	4	4	4	0	0	0	绿色, 果味	MS, RI, odor, S
19	苯甲醛	1518	4	4	4	4	16	16	杏仁、果香、木香	MS, RI, odor, S
20	(E)-2-壬烯醛	1 531	16	64	64	0	0	4	泥土味	MS, RI, odor, S
21	1-辛醇	1 559	64	64	64	4	16	16	脂肪, 花香, 绿色	MS, RI, odor, S
22	苯乙醛	1 643	16	64	64	64	256	256	蜂蜡, 陈旧/花香	MS, RI, odor, S
23	(E)-2-癸烯醛	1 654	16	64	64	0	4	4	脂肪, 绿色, 牛油味	MS, RI, odor, S
24	(E, E)-2,4-壬二烯醛	1 778	4	64	64	64	64	64	脂肪, 绿色, 蜡味	MS, RI, odor, S
25	(E)-2-十一烯醛	1 861	4	64	64	64	64	64	脂肪, 绿色, 汤	MS, RI, odor, S
26	(E, Z)-2,4-癸二烯醛	1 882	4	256	64	64	64	64	油炸, 肥腻	MS, RI, odor, S
27	(E, E)-2,4-癸二烯醛	2 001	256	256	256	64	64	64	油炸香	MS, RI, odor, S
28	己酸	2 050	0	0	4	0	0	16	汗臭味	MS, RI, odor, S
29	庚酸	2 130	0	0	4	0	0	16	汗臭味	MS, RI, odor, S
30	顺式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛	2 182	4	16	16	64	64	64	金属味	MS, RI, odor, S
31	反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛	2 197	256	256	256	256	256	256	金属味	MS, RI, odor, S
32	2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮	2 214	ND	ND	ND	256	256	256	焦糖味	MS, RI, odor, S
33	辛酸	2 264	0	0	4	0	0	4	汗味, 蜡质, 脂肪, 腐臭	MS, RI, odor, S
34	壬酸	2 370	4	4	64	0	4	16	发霉、腐臭、刺鼻	MS, RI, odor, S

注: ^aNo.根据气味在毛细管 DB-WAX 上的保留指数连续编号。^b使用 DB-WAX 毛细管柱上的一系列正构烷烃测定保留指数。^cFD 因子是通过 AEDA 法在毛细管 DB-WAX 色谱柱上测定的; ^d气味质量通过 GC-O 检测。^eMS, 由 NIST 14 质谱数据库鉴定; RI, 为文献中公布的保留指数; 气味, 与文献中公布的气味特征一致; S, 包括 MS, RI 和气味特征在内的分析参数与标准品的参数一致。ND: 未检测到。

Note: ^aOdorants were consecutively numbered according to their retention indices on capillary DB-WAX. ^bRI's were determined using a homologous series of n-alkanes on DB-WAX capillary columns; ^cFD factor was determined by AEDA on a capillary DB-WAX column; ^dOdor quality was detected by GC-O; ^eMS, identified by NIST 14 mass spectral database; RI, agreed with the retention indices published in literature; odor, agreed with the odor characteristics published in literature; S, the analytical parameters including MS, RI, and odor characteristics agreed with those of the injected authentic chemicals. ND: not detected.

表 5 煎炸油样品中香气活性化合物的浓度和气味活性值
Table 5 Concentrations and odor activity values of aroma-active compounds in frying oil samples

风味活性物质	^a 保留指数	^b 油中阈值/ ($\mu\text{g/kg}$)	^c 含量/($\mu\text{g/kg}$)			风味活性值			^e 离子/(m/z)	^f 定量方程	^g R^2
			RO1	RO2	RO3	RO1	RO2	RO3			
己醛	1 087	120	1 864	4 390	5 768	16	37	48	44, 56, 41	$y = 2.279 5x + 0.017 0$	0.996 9
庚醛	1 182	250	987	3 682	4 509	4	15	18	70, 55, 44	$y = 1.584 7x + 0.010 8$	0.999 6
2-戊基呋喃	1 235	100	1 016	3 843	4 045	10	38	40	81, 53, 82	$y = 2.524 2x + 0.020 4$	0.992 4
辛醛	1 291	56	4 663	11 864	14 420	83	212	257	41, 57, 84	$y = 0.916 9x + 0.009 8$	0.999 0
(E)-2-庚烯醛	1 323	50	1 289	2 022	1 827	26	40	37	41, 55, 83	$y = 2.878 6x - 0.008 7$	0.996 9
壬醛	1 395	150	16 097	24 191	25 249	107	161	168	41, 57, 70	$y = 1.520 9x + 0.142 8$	0.996 1
(E)-2-辛烯醛	1 426	120	3 650	9 329	9 764	30	78	81	41, 55, 70	$y = 1.584 2x - 0.005 5$	0.995 1
(E,E)-2,4-庚二烯醛	1 490	360	6 573	9 837	7 146	18	27	20	81, 110, 53	$y = 6.269 0x + 0.046 0$	0.992 1
癸醛	1 497	650	3 106	3 487	3 685	5	5	6	41, 43, 57	$y = 1.426 8x - 0.002 6$	0.992 3
3-庚烯-2-酮	1 508	250	4	505	547	<1	2	2	55, 43, 125	$y = 7.510 2x + 0.097 5$	0.999 4
苯甲醛	1 518	60	10	84	91	<1	1	2	77, 106, 51	$y = 24.889x + 0.044 6$	0.995 3
(E)-2-壬烯醛	1 531	150	1 901	10 111	10 184	13	67	68	41, 55, 70	$y = 1.651 8x + 0.075 7$	0.993 3
1-辛醇	1 559	27	848	1 267	1 326	31	47	49	56, 41, 69	$y = 3.449 5x + 0.012 0$	0.998 1
苯乙醛	1 643	22	77	448	77	4	20	4	91, 120, 65	$y = 1.672 8x + 0.012 6$	0.996 1
(E)-2-癸烯醛	1 654	1 610	43 170	62 826	65 441	27	39	41	41, 70, 55	$y = 1.136 8x - 0.031 2$	0.991 9
(E,E)-2,4-壬二烯醛	1 778	30	24	895	1 232	1	30	41	81, 41, 67	$y = 56.601x + 0.342 0$	0.997 1
(E)-2-十一烯醛	1 861	3 200	5 902	66 981	56 609	2	21	18	41, 70, 55	$y = 2.451 4x - 0.035 0$	0.990 6
(E,E)-2,4-癸二烯醛	2 001	66	15 359	40 868	32 206	233	619	488	81, 41, 67	$y = 2.525 7x - 0.109 2$	0.994 2
己酸	2 050	460	85	1 426	3 471	<1	3	8	60, 73, 41	$y = 1.695 9x + 0.642 3$	0.991 2
庚酸	2 130	100	113	797	1 449	1	8	14	60, 73, 87	$y = 4.657 6x + 0.148 6$	0.976 4
反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛	2 197	25	620	5 180	3 394	25	207	136	68, 41, 55	$y = 1.014 1x + 0.088 6$	0.978 8
辛酸	2 264	3 000	373	665	979	<1	<1	<1	60, 73, 43	$y = 2.848 1x + 0.311 6$	0.999 4
壬酸	2 370	50	403	1 618	1 692	8	32	34	60, 73, 41	$y = 2.968 5x + 0.343 6$	0.999 6

注: ^a 使用 DB-WAX 毛细管柱上的一系列正构烷烃测定保留指数。 ^b 油中的气味阈值 ($\mu\text{g/kg}$) 来自参考文献 van Gemert^[17]。 ^c 样品的平均浓度, ^d 通过将浓度除以气味阈值来计算 OAV。 ^e 用于定量的监测离子, ^f 变量: y 是相对于内标 1,2-二氯苯的峰面积, x 是相对于内标 1,2-二氯苯的煎炸油样品中的浓度。 ^g 煎炸油校准方程式的 R^2 。 ND: 未检测到。

Note: ^a RIs were determined using a homologous series of n-alkanes on DB-WAX capillary columns. ^b Odor thresholds were from reference (van Gemert, 2011). ^c The average concentration of sample. ^d OAVs were calculated by dividing the concentrations by the odor thresholds. ^e Monitored ions used for quantitation. ^f Variables: y is the peak area relative to that of the internal standard, 1,2-dichlorobenzene, and x is the concentration ($\mu\text{g/g}$) in the frying oil sample relative to that of the internal standard, 1,2-dichlorobenzene. ^g R^2 of Calibration equations for frying oil. ND: not detected.

庚酸(均有汗味和酸败味)浓度比 FF1 和 FF2 高,而 FF3 中的壬酸表现出最高的 OAV(OAV=124),这与 AEDA 的结果是一致的。因此,这些酸的上升导致了 FF3 的酸味。然而, AEDA 和 OAV 的结果在(E)-2-十一稀和 2,5-二甲基吡嗪这几种物质上面不一致,它们表现出较高的 FD 因子值(64),但 OAV 较低。此外, 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、己醛和壬酸在薯条中的 FD 值较低(≤ 16), OAV 较高。

3 结论

在连续使用高油酸菜籽油的过程中,薯条风味的发展经历了三个明显的阶段(诱导,最佳,

降解)。在第一煎炸阶段(总极性组分含量 3.0%~8.0%)中,薯条的风味得到改善,下一阶段(总极性组分含量 8.0%~20%)则表现出较高的风味评分,最后阶段(总极性组分含量高于 22%),风味评分的可接受度逐渐降低。分子感官科学分析表明, RO3 和 FF3 中令人不快的恶臭味主要来源于新产生的酸,即己酸、庚酸和壬酸。此外,少量饱和醛(脂肪气味)和苯乙醛(陈腐气味)的增加也可能导致较低的感官评分。因此,为优化煎炸操作,必须尽可能地使油保持在最佳阶段内,并限制异味物质的产生。

表 6 薯条中香气活性化合物的浓度和气味活性值

Table 6 Concentrations and odor activity values of aroma-active compounds in French fries

风味活性物质	^a 保留指数	^b 油中阈值/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	^c 含量/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)			风味活性值			^e 离子/(m/z)	^f 定量方程	^g R^2
			FF1	FF2	FF3	FF1	FF2	FF3			
2-甲基丁醛	858	13	106	6 798	5 966	8	523	459	41, 29, 57	$y = 57.1x + 7.785$	0.992 0
己醛	1 087	120	1 418	2 867	3 109	12	24	26	44, 56, 41	$y = 0.031 7x - 0.066 8$	0.997 4
庚醛	1 182	250	29	33	29	<1	<1	<1	70, 55, 44	$y = 0.152 4x - 0.042 2$	0.991 9
2-戊基呋喃	1 235	100	362	2 279	3 655	4	23	37	81, 53, 82	$y = 1.759x + 0.007 7$	0.997 3
辛醛	1 291	56	962	1 320	1 750	17	24	31	41, 57, 84	$y = 0.124 7x - 0.066 6$	0.991 3
(E)-2-庚烯醛	1 323	50	20	374	237	<1	7	5	41, 55, 83	$y = 0.059 2x + 0.037 6$	0.991 9
2,5-二甲基吡嗪	1 340	2 600	7 762	6 112	8 249	3	2	3	42, 108, 39	$y = 0.065 2x + 0.005 2$	0.998 2
2,6-二甲基吡嗪	1 340	1 021	743	816	816	1	1	1	42, 108, 39	$y = 0.065 2x + 0.005 2$	0.998 2
2-乙基-5-甲基-吡嗪	1 372	40	9	0	5	<1	<1	<1	121, 40, 94	$y = 0.695 4x + 0.005 4$	0.999 5
2-乙基-6-甲基吡嗪	1 372	40	367	77	360	9	2	9	121, 40, 94	$y = 0.695 4x + 0.005 4$	0.999 5
壬醛	1 395	150	318	1 142	1 682	2	8	11	41, 57, 70	$y = 0.357 5x - 0.117 8$	0.995 5
2-乙基-3-甲基-吡嗪	1 402	500	227	175	62	<1	<1	<1	121, 67, 80	$y = 0.041 1x - 0.003 8$	0.994 9
(E)-2-辛烯醛	1 426	120	244	129	256	2	1	2	41, 55, 70	$y = 0.273x - 0.004 1$	0.997 1
2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪	1 436	3	140	296	161	47	99	54	135, 56, 39	$y = 0.052 9x + 0.011 3$	0.996 5
3-(甲硫基)-丙醛	1 454	0.52	95	97	99	182	186	190	48, 104, 76	$y = 0.004 3x - 0.012 1$	0.992 7
(E,E)-2,4-庚二烯醛	1 490	360	829	1 004	766	2	3	2	81, 110, 53	$y = 0.401 7x - 0.001 2$	0.995 5
癸醛	1 497	650	23	74	226	<1	<1	<1	41, 43, 57	$y = 0.85x + 0.029$	0.992 9
3-壬烯-2-酮	1 508	250	8	12	34	<1	<1	<1	55, 43, 125	$y = 1.051 2x + 0.027 2$	0.995 4
苯甲醛	1 518	60	14	128	346	<1	2	6	77, 106, 51	$y = 1.062 9x + 0.001 2$	0.995 3
(E)-2-壬烯醛	1 531	150	94	542	697	1	4	5	41, 55, 70	$y = 0.563 5x + 0.027$	0.995 3
1-辛醇	1 559	27	162	202	241	6	7	9	56, 41, 69	$y = 0.201 9x - 0.039 7$	0.998 7
苯乙醛	1 643	22	855	1 572	1 847	38	71	84	91, 120, 65	$y = 0.052 6x - 0.010 4$	0.994 3
(Z)-2-癸烯醛	1 654	1 610	2 131	5 930	6 085	1	4	4	41, 70, 55	$y = 0.819 5x - 0.019 2$	0.996 9
(E, E)-2,4-壬二烯醛	1 778	30	7	57	94	<1	2	3	81, 41, 67	$y = 1.159 5x + 0.013 9$	0.993 9
(E)-2-十一烯醛	1 861	3 200	3	6 968	7 620	<1	2	2	41, 70, 55	$y = 2.451 4x - 0.035$	0.990 6
(E,E)-2,4-癸二稀醛	2 001	66	2 433	8 866	4 363	37	134	66	81, 41, 67	$y = 1.547 9x - 0.009 1$	0.998 4
己酸	2 050	460	124	175	319	<1	<1	1	60, 73, 41	$y = 0.021 7x + 0.007 8$	0.991 0
庚酸	2 130	100	10	40	50	<1	<1	<1	60, 73, 87	$y = 0.042 1x + 0.212 8$	0.991 0
反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛	2 197	25	432	2 181	2 445	17	87	98	68, 41, 55	$y = 0.046x + 0.013 1$	0.997 9
2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮	2 214	27.4	3 972	2 968	2 184	145	108	80	43, 57, 128	$y = 0.002 3x + 0.010 6$	0.999 0
辛酸	2 264	3 000	3 598	6 121	9 611	1	2	3	60, 73, 43	$y = 0.059 6x - 0.010 5$	0.993 8
壬酸	2 370	50	1 596	5 158	6 183	32	103	124	60, 73, 41	$y = 0.036 8x + 0.211 2$	0.981 3

注: ^a用 DB-WAX 毛细管柱上的一系列正构烷烃测定保留指数。^b油中的气味阈值 ($\mu\text{g}/\text{kg}$) 来自参考文献 van Gemert^[17]。^c样品的平均浓度。^d通过将浓度除以气味阈值来计算 OAV。^e用于定量的监测离子。^f变量: y 是相对于内标 1,2-二氯苯的峰面积, x 是炸薯条样品中相对于内标 1,2-二氯苯的峰浓度。^g薯条校准方程的 R^2 。ND: 未检测到。

Note: ^aRIs were determined using a homologous series of n-alkanes on DB-WAX capillary columns. ^bOdor thresholds in oil ($\mu\text{g}/\text{kg}$) and ^codor thresholds in water ($\mu\text{g}/\text{L}$) were from reference (van Gemert, 2011). ^dThe average concentration of sample. ^eOAVs were calculated by dividing the concentrations by the odor thresholds. ^fMonitored ions used for quantitation. ^gVariables: y is the peak area relative to that of the internal standard, 1,2-dichlorobenzene, and x is the concentration ($\mu\text{g}/\text{g}$) in the French fries sample relative to that of the internal standard, 1,2-dichlorobenzene. ^h R^2 of Calibration equations for French fries. ND: not detected.

致谢: 这项工作得到了国家食品科学技术一级学科计划 (JU FSTR20180202)、江苏省研究生研究与实践创新计划 (KYCX20_1852)、国家自然科学基金 (3191728)、江苏省博士后科研基金项目 (2020Z297) 的资助。

参考文献:

- [1] KITA A, GRAŻYNA L. The influence of oil type and frying temperatures on the texture and oil content of french fries[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 85 (2010) 2600-2604.
- [2] CHANG C, WU G, ZHANG H, et al. Deep-fried flavor:

- characteristics, formation mechanisms, and influencing factors [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 1-19.
- [3] RICHARD F, STIER. Chemistry of frying and optimization of deep-fat fried food flavour-an introductory review[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2000, 102: 507-514.
- [4] ZHANG Q, SALEH A S M, CHEN J, et al. Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: a review[J]. *Chemistry & Physics of Lipids*, 2012, 165(6): 662-81.
- [5] BLUMENTHAL M, STIER R. Optimization of deep-fat frying operations[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1991, 2: 144-148.
- [6] ALADEDUNYE F, PRZYBYLSKI R. Performance of palm olein and modified rapeseed, sunflower, and soybean oils in intermittent deep-frying[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2014, 116(2): 144-152.
- [7] THÜRER A, GRANVOGL M. Generation of desired aroma-active as well as undesired toxicologically relevant compounds during deep-frying of potatoes with different edible vegetable fats and oils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(47): 9107-9115.
- [8] ENRÍQUEZ-FERNÁNDEZ B, ÁLVAREZ DE LA CADENA Y YAÑEZ L, SOSA-MORALES & M E. Influence of oil type and freshness on the sensory perception of fried foods[J]. *Journal of Culinary Science & Technology*, 2012, 10(2): 145-153.
- [9] SANTOS C, MOLINA-GARCIA L, CUNHA S, et al. Fried potatoes: Impact of prolonged frying in monounsaturated oils[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 192-201.
- [10] NEUGEBAUER A, GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Characterization of the key odorants in high-quality extra virgin olive oils and certified off-flavor oils to elucidate aroma compounds causing a rancid off-flavor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(21): 5927-5937.
- [11] YANG P, LIU C, SONG H, et al. Sensory-directed flavor analysis of off-flavor compounds in infant formula with deeply hydrolyzed milk protein and their possible sources[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 119: 108861.
- [12] LI X, LI J, WANG Y, et al. Effects of frying oils' fatty acids profile on the formation of polar lipids components and their retention in French fries over deep-frying process[J]. *Food Chemistry*, 2017, 237: 98-105.
- [13] LI X, WU X, LIU R, et al. Effect of frying conditions on fatty acid profile and total polar materials via viscosity[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 166: 349-355.
- [14] AOAC Official methods of analysis (16th ed.). Washington DC: Association of Official Analytical Chemists Inc, 1995.
- [15] YOST M, ABU-ALI J M, BARRINGER S A. Kinetics of potato color and texture development during baking, frying, and microwaving with the addition of liquid smoke[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71: E364-E369.
- [16] LIU H, WANG Z, ZHANG D, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing roasted duck by Gas chromatography–Olfactometry–Mass Spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(20): 5847-5856.
- [17] VAN GEMERT L J, ODOUR THRESHOLDS. Compilations of odour threshold values in air, water and other media, second enlarged and revised ed[M]. Oliemans Punter & Partners BV: Netherlands, 2011.
- [18] LIU Y, LI J, CHENG Y, et al. Effect of frying oils' fatty acid profile on quality, free radical and volatiles over deep-frying process: A comparative study using chemometrics[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 101: 331-341.
- [19] ABDULKARIM S, LONG K, LAI O, et al. Ghazali, Frying quality and stability of high-oleic moringa oleifera seed oil in comparison with other vegetable oils[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(4): 1382-1389.
- [20] KITA A, LISIŃSKA, GRAZYNA, et al. The influence of frying medium degradation on fat uptake and texture of french fries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005, 85(7): 1113-1118.
- [21] WAGNER R, GROSCH W. Evaluation of potent odorants of french fries[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1997, 30(2): 164-169.
- [22] JOSEPHSON D, LINDSAY R. Retro-aldol related degradations of 2, 4-decadienal in the development of staling flavors in fried foods[J]. *Journal of Food Science*, 1987, 52(5): 1186-1190.
- [23] ZHANG Q, QIN W, LIN D, et al. The changes in the volatile aldehydes formed during the deep-fat frying process[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 7683-7696.
- [24] BREWER M, VEGA J, PERKINS E. Volatile compounds and sensory characteristics of frying fats[J]. *Journal of Food Lipids*, 1999, 6: 47-61.
- [25] WAGNER R K, GROSCH W. Key odorants of French fries[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1998, 75(10): 1385.
- [26] SCHIRACK A, DRAKE M, SANDERS T H, et al. Characterization of aroma-active compounds in microwave blanched peanuts[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(9): C513-C520.
- [27] ZAMORA R, ALCÓN E, HIDALGO F. Strecker-type degradation of phenylalanine initiated by 4-oxo-2-alkenals in comparison to that initiated by 2,4-alkadienals, 4, 5-epoxy-2-alkenals, or 4-hydroxy-2-nonenal[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43): 10231-10237. ㊞