

浓香菜籽油挥发性风味物质的研究进展

蒋黎艳¹, 邓志薇¹, 李佳灵¹, 朱定萍², 肖新生¹

(1. 湖南科技学院 化学与生物工程学院, 湖南 永州 425199; 2. 市场监督管理局, 湖南 永州 425002)

摘要: 为了对浓香菜籽油的风味品质控制及产业的健康发展提供参考, 概述了浓香菜籽油中的挥发性风味物质, 并总结了浓香菜籽油挥发性风味物质种类和含量的影响因素。浓香菜籽油中主要的挥发性风味物质包括硫苷降解产物、脂质氧化产物、杂环类化合物, 其中硫苷降解产物赋予浓香菜籽油辛辣香味, 脂质氧化产物赋予浓香菜籽油青香、果香和油香, 杂环类化合物使浓香菜籽油呈现坚果香、焙烤香和些许焦糖香。原料品种、原料预处理方式、油脂精炼工艺以及储存条件均会影响浓香菜籽油中的挥发性风味物质种类和含量。因此, 应选择合适的原料、加工工艺和储存条件, 以确保浓香菜籽油产品质量。

关键词: 浓香菜籽油; 挥发性风味物质; 油料品种; 加工工艺; 储存

中图分类号: TS225.1; TQ646 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)09-0066-06

Research progress on volatile flavor compounds of fragrant rapeseed oil

JIANG Liyan¹, DENG Zhiwei¹, LI Jialing¹, ZHU Dingping², XIAO Xinsheng¹

(1. College of Chemistry and Bioengineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan, China; 2. Market Supervision Administration, Yongzhou 425002, Hunan, China)

Abstract: In order to provide reference for the flavor quality control of fragrant rapeseed oil and the healthy development of the industry, the volatile flavor compounds in fragrant rapeseed oil, and the influence factors of the types and contents of volatile flavor compounds in fragrant rapeseed oil were summarized. The main volatile flavor compounds in fragrant rapeseed oil include glucosinolate degradation products, lipid oxidation products and heterocyclic compounds. Among them, glucosinolate degradation products endow fragrant rapeseed oil with spicy flavor, lipid oxidation products endow fragrant rapeseed oil with green, fruity and oily flavor, and heterocyclic compounds endow fragrant rapeseed oil with nutty, roasted and caramel flavor. Raw material varieties, raw material pretreatment methods, oil refining process and storage conditions will affect the types and contents of volatile flavor compounds in fragrant rapeseed oil. Appropriate raw materials, processing technology and storage conditions should be selected to ensure the quality of fragrant rapeseed oil.

Key words: fragrant rapeseed oil; flavor compounds; oilseed variety; processing technology; storage

菜籽油是我国主要食用油之一, 也是产量仅次于大豆油和棕榈油的世界第三大植物油^[1]。近年来, 浓香型油脂产品在我国食用植物油市场上的占

比逐年增大, 在国内菜籽油市场已占到了 30%, 成为菜籽油的主导产品之一, 具有良好的市场发展前景^[2]。浓香菜籽油是以油菜籽为原料, 对其进行清理除杂后, 通过控制炒籽温度以及时间来保证浓香菜籽油品质, 再通过压榨的方法制得原油, 最后经过沉淀、过滤、冷却和精炼等工艺, 制得具有独特浓郁香味的成品菜籽油。与普通菜籽油相比, 浓香菜籽油具有更为浓郁且独特的坚果香、焙烤香、辛辣香等风味^[3-4]。

浓香菜籽油的浓郁香味主要来自其中的挥发性

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2024-03-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30289, 2024JJ7192); 永州市指导性科技计划项目(2023YZ022)

作者简介: 蒋黎艳(1989), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为食品安全检测与油脂化学(E-mail)ljy5423@163.com。

通信作者: 肖新生, 教授, 博士(E-mail)58022849@qq.com。

风味物质,主要包括硫苷降解产物、脂质氧化产物和杂环类化合物三大类^[5]。其中,挥发性的硫苷降解产物是浓香菜籽油辛辣香味的主要来源,脂质氧化产物赋予了浓香菜籽油青香、果香和油香,杂环类化合物使浓香菜籽油呈现坚果香、焙烤香和些许焦糖香^[6]。浓香菜籽油中挥发性风味物质的种类和含量不仅会因品种不同而存在一定的差异,也会因预处理和精炼等加工工艺的不同而不断发生变化或者产生新的风味物质,因此浓香菜籽油的风味形成是一个动态过程,是多种因素影响的综合结果。本文对浓香菜籽油的主要挥发性风味物质进行了概述,总结了原料品种、原料预处理、油脂精炼和储存等因素对其挥发性风味物质的影响,旨在为浓香菜籽油的风味品质控制及产业的健康发展提供参考。

1 浓香菜籽油的挥发性风味物质

1.1 硫苷降解产物

硫苷与黑芥子酶广泛存在于十字花科植物中,是发生降解反应的重要物质。硫苷存在于油菜籽细胞的液泡中,黑芥子酶存在于细胞质中,通常硫苷稳定存在于细胞中,但细胞在受到压力等外力因素时会破碎,硫苷与黑芥子酶接触并发生酶解反应生成一些具有辛辣香味的挥发性物质^[7-8]。另外,硫苷在非酶热降解时主要生成产物是腈类化合物和异硫氰酸酯,温度越高,降解反应速度越快,生成腈类化合物的量越大^[9]。研究表明,浓香菜籽油挥发性风味成分中硫苷降解产物含量最高,占挥发性成分总量的58.46%^[5]。

浓香菜籽油中硫苷降解产物(主要包括异硫氰酸酯和腈类化合物)是浓香菜籽油产生辛辣香味和清香味的主要来源之一,主要包括甲基烯丙基氰、5-甲基己腈、庚腈、5-己烯腈、苯代丙腈、3-丁烯腈、2,4-戊二烯腈、苯乙腈、3-丁烯基异硫氰酸酯等物质^[6]。其中:甲基烯丙基氰、5-甲基己腈和庚腈的阈值和香味描述未知^[6],5-己烯腈呈现无味^[10],苯代丙腈呈现辛辣香味,3-丁烯腈呈现硫香,2,4-戊二烯腈呈现清香,苯乙腈呈现花香、清香、草木香,3-丁烯基异硫氰酸酯呈现硫香和辛辣香味^[11]。

1.2 脂质氧化产物

浓香菜籽油中挥发性脂质氧化产物主要包括醛、酮、酸、酯等化合物,赋予油脂特有的清香、果香和脂香味^[12]。浓香菜籽油中挥发性脂质氧化产物主要包括壬醛、辛醛、己醛、(E)-2-辛醛、2,4-癸二烯醛、(E)-2-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、3,5-辛二烯-2-酮、丙酸、2-甲氧基-4-乙基苯酚、

丁位己内酯等物质^[13]。其中醛类物质的种类最多,醛类物质也是浓香菜籽油的主要呈味物质,主要通过游离脂肪酸氧化分解产生,如己醛源于亚油酸氧化^[14],辛醛、壬醛源于油酸的氧化^[15-16]。醛类物质主要呈现果香、清香和油香,例如己醛呈现清香^[17], (E)-2-辛醛呈现坚果香、油脂香、清香, (E,E)-2,4-癸二烯醛则为油炸香、油脂香, (E)-2-癸烯醛呈现出牛油香,壬醛具有肥皂香、柑橘香^[15,18]。当醛类物质的浓度较低时,浓香菜籽油更多地呈现出令人愉悦的青草味、花香及油脂香,而醛类物质的浓度较高时则呈现刺鼻的哈喇味和油脂氧化酸败的味道^[19]。除此之外,酮类物质,如1-辛烯-3-酮呈现草本香、蘑菇香、土香,3,5-辛二烯-2-酮呈现花香^[17];酸类物质,如己酸呈现油脂香、青香,丙酸具有汗香味^[20];酯类物质,如2-甲基丁酸乙酯呈现果香,丁位己内酯呈现烤香味等^[21];少数酚类化合物则呈现木香、烟熏香和焦香味,如2-甲氧基-4-乙基苯酚呈现烟熏香和木香^[22]。上述气味大多对浓香菜籽油的辛辣刺激味和焙烤香味起一定的修饰和协同增味作用,从而构成浓香菜籽油丰富而浓郁的风味特征。

1.3 杂环类化合物

浓香菜籽油中的杂环类化合物主要包括吡嗪、呋喃、吡咯、吡啶等,这些物质整体呈现出强烈的坚果香、焙烤香、咖啡香味^[23]。浓香菜籽油中的吡嗪、吡咯和吡啶类物质是油料在高温条件下发生美拉德反应而生成的,主要呈味物质以吡嗪为主,主要有2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等,呈现烤香、坚果香、焦糖香^[2,24-26]。此外,对浓香菜籽油有卓越贡献的呋喃类物质,可由果糖和葡萄糖的热降解形成^[27],还可产生于一些糖类物质的部分焦糖化反应中^[28],但主要是通过脂质过氧化和碳水化合物降解反应生成^[29],大多呈现焦糖香和水果香。例如:2-正戊基呋喃呈现黄油香、果香和焙烤香,2-乙酰基呋喃呈现焦糖香、肉桂香和甜香,4-羟基-2,5-二甲基呋喃呈现奶油香和烤焙风味,3-羟基-4,5-二甲基呋喃呈现焦香和辛香味,2-戊基呋喃呈现坚果香等^[6]。

1.4 其他类化合物

浓香菜籽油中除了硫苷降解产物、脂质氧化产物和杂环类化合物外,还有萜烯类等物质。部分萜烯类物质对浓香菜籽油风味也有一定的贡献,如2-蒎烯、*d*-柠檬烯、2,4-二甲基-1-庚烯、甲基

环己烯等赋予菜籽油清香和松木香^[30-31]。

2 浓香菜籽油挥发性风味物质的影响因素

2.1 原料品种

油菜籽作为浓香菜籽油制备的原料,其不同品种所含成分的差异导致制油过程中发生的一系列反应和反应的程度也不相同,造成所制取的浓香菜籽油主要挥发性风味物质有一定差异,从而呈现不同的风味。

我国制备浓香菜籽油的原料品种有两大类:一类是低芥酸、低硫苷的双低油菜籽品种,由其制取的浓香菜籽油中吡嗪类物质较多,如2-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪等,主要呈现出独特的烘焙香和烤坚果香;另一类则是高芥酸、高硫苷的传统双高油菜籽品种,由其制备的浓香菜籽油中硫苷降解产物含量较高,整体呈现出辛辣味、刺激味^[32]。初柏君等^[33]通过分析不同品种油菜籽的成分,发现传统油菜籽中硫代葡萄糖苷含量较高,其所制备的菜籽油中硫苷降解产物含量也较高,如3-丁烯基异硫氰酸酯、苯代丙腈等风味物质含量较高,使浓香菜籽油主要呈现出辛辣味。孙国昊等^[34]以双低油菜籽和传统的双高油菜籽为原料,在同样的工序下制取浓香菜籽油,结果发现,为浓香菜籽油提供辛辣风味的苯乙腈(仅在传统菜籽油中检出)、芳樟醇(仅在传统菜籽油中检出)、苯代丙腈等物质在传统浓香菜籽油中含量较高,而对浓香菜籽油具有甜味贡献的正己醇、苯乙醇、椰子醛等物质在双低菜籽油中含量更高。另外,当油菜籽中的蛋白质、碳水化合物含量较高时,所制备的浓香菜籽油中2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪等吡嗪类物质含量较高,使浓香菜籽油主要呈现出焦糊味和烤香味^[2,21]。

2.2 原料预处理

2.2.1 微波热处理

微波预处理可以使油菜籽发生美拉德反应、氨基酸降解等一系列反应,从而对菜籽油的风味产生影响。张欢欢等^[35]研究发现,随着微波预处理时间的延长,所制取的浓香菜籽油中硫苷降解产物的含量逐渐降低,而吡嗪类化合物的含量逐渐升高,整体风味由硫味、菜青味转变为烘烤香、坚果香。周琦等^[36]研究发现,随着微波预处理时间的延长,制备的菜籽油中硫苷降解产物的总含量呈先减少后增加的趋势,具有刺激性菜青味的1-丁烯基异硫氰酸酯在微波预处理3 min后大幅下降,不良风味减轻,微波预处理5~7 min,甲基氰化物、5-己腈、5-甲硫基-丁基腈、苯代丙腈含量明显增加,但均不具有

强烈的刺激性气味。从艳霞等^[37]也发现,微波预处理能促进油菜籽中硫代葡萄糖苷的降解,使菜籽油的香味更浓郁丰富。此外,周琦等^[38]研究发现,随着微波预处理时间的延长,2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪和3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等吡嗪类化合物含量逐渐增加,使菜籽油呈现出浓郁的焙烤风味。

2.2.2 烘烤热处理

烘烤是油料常用的预处理方法之一,也是浓香菜籽油产生坚果烤香风味的主要步骤之一^[39]。朱家彬等^[40]研究发现,油菜籽经过高温烘烤预处理后,所制备的菜籽油中辛辣味、青草味减少,而烘烤香、坚果香等风味增加。烘烤预处理还能促使硫苷降解,随着烘烤温度的升高,硫苷含量逐渐降低,很大程度上减少了菜籽油中刺激性气味的产生^[41]。此外,浓香菜籽油中呈现刺激性香气的物质随着烘烤温度的升高和烘烤时间的延长,呈先上升后下降的趋势^[42]。

2.2.3 红外热处理

红外预处理不仅能够提高出油率,还能改善浓香菜籽油的风味特征。在红外高温焙炒的条件下生成的醛类物质,如己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛和(E,E)-2,4-癸二烯醛,使菜籽油的油脂风味增强,因美拉德反应生成的吡嗪、呋喃类化合物,如2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-戊基呋喃等增添了菜籽油的烤香风味和果香^[43];红外预处理还加快了油菜籽中硫苷的降解,产生了大量的异硫氰酸酯与腈类化合物,如4-异硫氰酸-1-丁烯、3-异硫氰酸-1-丙烯,使浓香菜籽油呈现菜青味和辛辣刺激味^[44]。另外,与传统的炒籽热处理相比,红外预处理可促进硫苷的酶解和非酶热降解,同时也促进了美拉德反应的进行,在同样的温度和时间条件下,红外炒籽处理的菜籽油中的2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪含量比传统预处理的要高^[43-45],烤香风味也更为突出。

2.2.4 炒籽热处理

炒籽热处理中的炒籽温度、炒籽时间和入炒水分对浓香菜籽油中的硫苷降解产物、醛类、杂环类等物质都有不同程度的影响,进而影响浓香菜籽油风味物质的组成和香气特征。

炒籽温度对菜籽油风味具有一定的影响。吴浪等^[46]研究发现,随着炒籽温度的升高,浓香菜籽油中的杂环类化合物的含量总体呈增加趋势,而硫苷降解产物的含量呈先增加后降低的趋势,因此随着炒籽温度的持续上升,烘焙风味增加,辛辣味和菜青

味先上升后降低。刘春梅等^[47]研究发现,低温压榨菜籽油和不同炒籽温度压榨制取的浓香菜籽油中挥发性风味物质的种类差异较大,低温压榨菜籽油中主要的呈味物质以醛类为主,而浓香菜籽油中硫苷降解产物的相对含量最高,杂环类化合物中吡嗪类的种类最多。

炒籽时间对浓香菜籽油的风味也有重要影响,随炒籽时间的延长,浓香菜籽油的辛辣味、油脂香、焙烤味逐渐增加,甚至产生苦杏仁味。彭洁等^[48]研究表明,随着炒籽时间的延长,油菜籽的出油率增加,并且菜籽油的感官评分也增加,但炒籽时间过长会导致油菜籽出油率和菜籽油感官评分降低。毛晓慧^[13]研究发现,浓香菜籽油的菜青味随着炒籽时间的延长逐渐消失,腈类、吡嗪类和含硫类(硫氰酸酯和其他硫化物)等大量新的挥发性物质开始出现并增加,这些挥发性物质共同赋予浓香菜籽油辛辣、烤香和苦杏仁的独特油脂风味,使其烤香味更为浓郁和突出。

油菜籽入炒水分对浓香菜籽油风味也有一定的影响。扈柏文等^[49]研究发现,随着油菜籽入炒水分的增加,杂环类化合物含量呈现先上升后下降趋势,硫苷降解产物含量则是逐渐增加,浓香菜籽油刺激味和生青味更加突出。

综上,微波热处理、烘烤热处理、红外热处理和炒籽热处理的高温条件都能够促进美拉德反应的进行,产生吡嗪类物质,并且促进了硫苷的降解,总体上使浓香菜籽油的烤香味和坚果香更加浓郁。

2.3 油脂精炼

植物油的精炼主要包括脱胶、碱炼脱酸、脱色和脱臭等工序。邓龙^[50]研究表明,菜籽油在精炼过程中,杂环类物质逐渐减少,醛类和硫氰类物质在碱炼过程中增加,在脱色和脱臭过程中减少,菜籽油中的风味成分在脱色和脱臭过程中变化最为显著,因此控制好脱色和脱臭这两个工序对减少香味成分的损失非常关键。

苏晓霞等^[51]研究表明:菜籽原油中主要以吡嗪类化合物和硫苷降解产物为呈香物质,但随着精炼程度的增加,这两类物质的种类和含量会显著降低,最终脱臭油中未检出吡嗪类化合物以及仅检出1种硫苷降解产物;经过脱胶工艺后,菜籽原油中呈现明显烤坚果味、烘烤味的2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪物质,具有柠檬味的柠檬烯,以及具有烤香味的丁位己内酯基本完全损失。仲琴^[52]研究发现,脱色处理后菜籽油中醛类物质的种类增加并且含量最高,而经脱色和脱臭处理后硫苷降解产物的相对含量显著降低。

谢婧等^[53]研究也发现,与菜籽原油相比,精炼菜籽油挥发性风味成分中脂质氧化产物(尤其是醛类)相对含量明显提高,而4-甲硫基-丁腈、3-苯基丙腈、4-异硫氰基-1-丁烯等硫苷降解产物及2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪等杂环类化合物的种类和相对含量显著下降。杨涓等^[54]研究发现,菜籽原油经脱胶、脱酸、脱色、脱臭等处理后,一级油中的醛、酮、醇、烃类等化合物的种类和相对含量明显增加,但未检测到硫苷降解产物。

总体而言,油脂精炼会使浓香菜籽油中的硫苷降解产物和杂环类物质含量大幅减少甚至完全消失,使浓香菜籽油的辛辣刺激味和坚果香逐渐消失,呈现出清香和油脂香。

2.4 油脂储存

菜籽油中的不饱和脂肪酸含量较高,在储存过程中易发生氧化反应,生成大量的醛、酮类物质和低分子化合物,使菜籽油产生不愉快的异味,影响产品的质量与安全^[55]。

蒋林利^[56]研究发现,储存期间菜籽油挥发性风味物质醛类、酮类、烃类、杂环类物质和硫苷降解产物含量呈波动变化,而酯类物质含量先增加后降低。王伟等^[57]研究表明,储存温度过高,浓香菜籽油酸败速度加快,产生刺激性异味,还伴随着有害物质的产生,另外,随着储存时间的延长,酸值、过氧化值也明显增加,色泽加深。王茜茜等^[58]研究发现,随着储存温度的升高,浓香菜籽油中反式化合物如(*E*)-2-丁烯醛、(*E*)-2-戊烯醛、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛等物质的含量增加,醛类物质总含量上升,油脂氧化酸败程度提高。孙国昊等^[59]研究发现,在高温储存条件下,浓香菜籽油中硫苷降解产物的相对含量逐渐减少,而醛类物质逐渐成为浓香菜籽油中相对含量最高的挥发性成分,导致浓香菜籽油的特征辛辣香味明显减弱和不良风味产生。综上,储存温度和储存时间是影响浓香菜籽油挥发性风味成分的主要因素。另外,油脂与空气、水分、金属、光线等接触会加速其氧化酸败,易产生难以接受的哈喇味^[60-61]。因此,为保证浓香菜籽油的品质,应进行低温避光或者充氮储存。

3 结语

浓香菜籽油中的挥发性风味物质主要包括硫苷降解产物、脂质氧化产物、杂环类化合物等,这些物质共同赋予了浓香菜籽油辛辣香、坚果香、焙烤香、油脂香和果香等。浓香菜籽油的原料品种、原料预处理方式、油脂精炼和储存条件等均会影响其风味。因此,为了保证浓香菜籽油的品质,应选择合适原

料、预处理方式,还需要控制加工条件,并进行低温避光或者充氮储存。近年来,浓香菜籽油因其特殊的浓郁风味深受消费者喜爱,对浓香菜籽油风味的研究也越来越多,有关如何平衡及调控菜籽油营养物质和风味特性的关系、菜籽油生产加工过程中关键风味物质变化的机制以及如何平衡油脂的精炼程度,最大限度地保留风味且确保质量安全,都是当前需要深入研究的问题。

参考文献:

- [1] SIGER A, JÓZEFIAK M, GÓRNAŚ P. Cold - pressed and hot - pressed rapeseed oil: The effects of roasting and seed moisture on the antioxidant activity, canolol, and tocopherol level[J]. *Acta Sci Pol Technol Aliment*, 2017, 16(1): 69 - 81.
- [2] ZHOU Q, JIA X, YAO Y Z, et al. Characterization of the aroma - active compounds in commercial fragrant rapeseed oils via monolithic material sorptive extraction[J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(41): 11454 - 11463.
- [3] ZHANG Y, WU G, CHANG C, et al. Determination of origin of commercial flavored rapeseed oil by the pattern of volatile compounds obtained via GC - MS and flash GC electronic nose[J/OL]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2020, 122(3): 1900332 [2023 - 06 - 13]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900332>.
- [4] KRALJIĆ K, STJEPANOVIĆ T, OBRANOVIĆ M, et al. Influence of conditioning temperature on the quality, nutritional properties and volatile profile of virgin rapeseed oil [J]. *Food Technol Biotechnol*, 2018, 56(4): 562 - 572.
- [5] 张谦益, 包李林, 熊巍林, 等. 浓香菜籽油挥发性风味成分的鉴定[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(3): 78 - 80.
- [6] 张友峰. 浓香菜籽油的香气特征及其关键呈香物质的形成与变化机制[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [7] WEI F, YANG M, ZHOU Q, et al. Varietal and processing effects on the volatile profile of rapeseed oils [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2012, 48(2): 323 - 329.
- [8] HOSSAIN M S, YE W, HOSSAIN M A, et al. Glucosinolate degradation products, isothiocyanates, nitriles, and thiocyanates, induce stomatal closure accompanied by peroxidase - mediated reactive oxygen species production in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2013, 77(5): 977 - 983.
- [9] 周锦兰, 胡健华. 硫代葡萄糖苷的结构及降解特性[J]. *武汉工业学院学报*, 2003(1): 58 - 61.
- [10] 李培武, 赵永国, 丁小霞, 等. 甘蓝型油菜叶片与种子硫甙相关性研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 587 - 592.
- [11] WANG G C, FARNHAM M, JEFFERY E H. Impact of thermal processing on sulforaphane yield from broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *italica*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(27): 6743 - 6748.
- [12] 谢婧, 徐俐, 张秋红, 等. 顶空固相微萃取法提取菜籽油挥发性风味成分[J]. *食品科学*, 2013, 34(12): 281 - 285.
- [13] 毛晓慧. 炒籽过程中浓香菜籽油产香机制的研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [14] NOE F, POLSTER J, GEITHE C, et al. OR2M3: A highly specific and narrowly tuned human odorant receptor for the sensitive detection of onion key food odorant 3 - mercapto - 2 - methylpentan - 1 - ol [J]. *Chem Senses*, 2017, 42(3): 195 - 210.
- [15] MATHEIS K, GRANVOGL M. Characterisation of the key aroma compounds in commercial native cold - pressed rapeseed oil by means of the sensomics approach[J]. *Eur Food Res Technol*, 2016, 242(9): 1565 - 1575.
- [16] MATTHÄUS B, HAASE N U, UNBEHEND G. Chemical and sensory characteristics of products fried in high - oleic, low - linolenic rapeseed oil [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(8): 799 - 808.
- [17] 李琳, 魏长庆. 美拉德反应机理及其在植物油中应用的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(9): 7 - 9.
- [18] ORTNER E, GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Elucidation of thermally induced changes in key odorants of white mustard seeds (*Sinapis alba* L.) and rapeseeds (*Brassica napus* L.) using molecular sensory science [J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(43): 8179 - 8190.
- [19] GRANVOGL M, BEKSAN E, SCHIEBERLE P. New insights into the formation of aroma - active strecker aldehydes from 3 - oxazolines as transient intermediates [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(25): 6312 - 6322.
- [20] GRACKA A, JELEŃ H H, MAJCHER M, et al. Flavoromics approach in monitoring changes in volatile compounds of virgin rapeseed oil caused by seed roasting [J]. *J Chromatogr A*, 2016, 1428: 292 - 304.
- [21] 苏晓霞, 刘雄飞, 黄一珍, 等. 基于 GC - MS 和 GC - O 的浓香菜籽油特征风味物质分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(1): 239 - 245.
- [22] 周易枚, 陆秦天, 任翊, 等. 浓香花生油中挥发性风味物质的鉴别分析[J]. *粮食与食品工业*, 2023, 30(1): 6 - 11.
- [23] 陶绍木, 张建华, 彭昌亚, 等. 杂环化合物的应用和发展[J]. *中国食品添加剂*, 2003(3): 31 - 34.
- [24] KARANGWA E, ZHANG X, MUREKATETE N, et al. Effect of substrate type on sensory characteristics and antioxidant capacity of sunflower Maillard reaction products [J]. *Eur Food Res Technol*, 2015, 240(5): 939 - 960.
- [25] 张谦益, 包李林, 熊巍林, 等. 不同产地浓香菜籽油中特征风味物质的研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 23 - 28.

- [26] 周易枚, 刘尧刚. 浓香菜籽油中挥发性风味物质的提取方法研究进展[J]. 食品安全导刊, 2020(15): 26-27.
- [27] GUO S, NA JOM K, GE Y. Influence of roasting condition on flavor profile of sunflower seeds: A flavoromics approach [J/OL]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 11295 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47811-3>.
- [28] 涂梦婕. 浓香型菜籽油制备的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- [29] ZHANG Y, LI X, LU X, et al. Effect of oilseed roasting on the quality, flavor and safety of oil: A comprehensive review [J]. *Food Res Int*, 2021, 150: 110791 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110791>.
- [30] 刘玉兰, 孙国昊, 王小磊, 等. 浓香菜籽油和精炼菜籽油氧化稳定性及挥发性成分的差异[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 35-45.
- [31] 纪佳璐, 鞠兴荣, 吴莹, 等. 菜籽油挥发性成分中特征风味物质研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(2): 119-123.
- [32] 张欢欢, 张玲, 黄桃翠, 等. 油菜籽品种对浓香菜籽油风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 187-194.
- [33] 初柏君, 扈柏文, 李晓龙, 等. 不同品种菜籽原料与浓香菜籽油风味品质的相关性[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 272-279.
- [34] 孙国昊, 刘玉兰, 连四超, 等. 油菜籽品种对浓香菜籽油风味及综合品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 190-197.
- [35] 张欢欢, 曾志红, 高飞虎, 等. 预处理技术对冷榨双低菜籽油品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 233-238.
- [36] 周琦, 杨湄, 郑畅, 等. 微波预处理对菜籽油中硫甾醇降解产物的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(3): 72-76.
- [37] 从艳霞, 郑明明, 郑畅, 等. 微波技术对油菜籽品质影响研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 151-156.
- [38] 周琦, 张敏, 贾潇, 等. 油菜籽微波过程对油中焙烤风味形成的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(12): 35-40.
- [39] 杨芙蓉, 王进英, 雷风, 等. 烘烤和微波预处理对植物油品质特性影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 121-129.
- [40] 朱家彬, 李研财, 苏彩虹, 等. 油料预处理对油脂品质影响的研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(10): 16-24.
- [41] 肖新生, 周旭, 蒋黎艳. 植物油加工工艺对风味物质影响的研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(9): 51-56, 70.
- [42] ZHANG Y, ZHEN C, ZHAO B, et al. Comparative characterization of key odorants and aroma profiles of fragrant rapeseed oil under different roasting conditions [J/OL]. *Food Res Int*, 2023, 163: 112195 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112195>.
- [43] 于杰, 周宇林, 刘元法, 等. 红外焙炒对菜籽油风味的影响机制[J]. 中国油脂, 2022, 47(1): 36-42.
- [44] YU J, WANG M, ZHANG M, et al. Effect of infrared ray roasting on oxidation stability and flavor of virgin rapeseed oils [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(7): 2990-3000.
- [45] WANG M Z, FAN L P, LI J W. A novel infrared roasting to improve the flavour profile of virgin rapeseed oils [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2023, 58(11): 6081-6091.
- [46] 吴浪, 徐俐, 谢婧, 等. 不同炒制温度对菜籽毛油挥发性风味物质的影响[J]. 中国油脂, 2012, 37(11): 39-43.
- [47] 刘春梅, 刘玉兰, 马宇翔, 等. 油菜籽炒籽温度对其油脂风味及综合品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 67-74, 83.
- [48] 彭洁, 陈甜甜, 潘亚瑜, 等. 浓香型菜籽油制备工艺的优化研究[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(2): 84-90.
- [49] 扈柏文, 武州, 于森, 等. 不同炒籽工艺对低芥酸浓香菜籽油风味的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(7): 33-37, 55.
- [50] 邓龙. 菜籽油特征香气成分和营养物质组成的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [51] 苏晓霞, 郭斐, 黄一珍, 等. 精炼过程对菜籽油风味成分的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(3): 41-47.
- [52] 仲琴. 菜籽油精炼和储藏过程中品质及香气成分变化研究[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [53] 谢婧, 徐俐, 吴浪, 等. SPME-GC-MS对菜籽毛油和精炼菜籽油挥发性风味成分的分析[J]. 中国油脂, 2012, 37(8): 84-87.
- [54] 杨湄, 刘昌盛, 周琦, 等. 加工工艺对菜籽油主要挥发性风味成分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(4): 551-557.
- [55] 李琳琳, 吴丹蕾, 李文青, 等. 不同储藏条件下菜籽油品质变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 87-92.
- [56] 蒋林利. 菜籽油加工与储藏过程中挥发性风味物质变化规律研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
- [57] 王伟, 张艳, 潘凤丽. 四级菜籽油在不同储藏温度下品质变化研究[J]. 粮食储藏, 2018, 47(5): 44-46, 56.
- [58] 王茜茜, 易起达, 袁建, 等. 顶空-气质联用分析一级菜籽油储藏期间挥发性成分变化[J]. 食品科技, 2013, 38(1): 187-190.
- [59] 孙国昊, 刘玉兰, 王小磊, 等. 低温储油对浓香菜籽油风味保鲜和质量保鲜的作用[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 14-20.
- [60] 程宏, 陈钊, 管伟举. 油脂氧化劣变及防范对策[J]. 粮食与油脂, 2010(4): 7-8.
- [61] ZHOU Q, JIA X, DENG Q C, et al. Quality evaluation of rapeseed oil in Chinese traditional stir-frying [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(11): 3731-3741.