

杏仁中的香气化合物及其风味品质影响因素研究进展

陈 臣¹, 周 洁¹, 周 琦², 娄新曼¹, 于海燕¹, 袁海彬¹, 田怀香^{1,*}

(1. 上海应用技术大学香料香精技术与工程学院, 上海 201418;

2. 农业农村部油料加工重点实验室, 湖北 武汉 430062)

摘要: 生杏仁富含醛类、醇类等气味物质, 具有鲜果、干草等气味, 热加工处理和贮藏过程中的各种化学反应使杏仁的气味发生显著变化, 这极大地影响了杏仁的风味品质。基于此, 本文总结了生杏仁中重要的气味化合物, 以及熟杏仁通过美拉德反应、脂肪酸的氧化、氨基酸和可溶性糖的降解等反应形成的主要香气化合物, 对比不同热加工方式及其处理条件对杏仁香气化合物及其气味属性的影响, 并进一步概述了贮藏期杏仁的主要香气化合物和异味化合物的组成变化, 总结合理的贮藏方法及条件, 最后对杏仁等坚果类食品未来可能的研究方向进行归纳展望, 为杏仁等坚果的热加工和贮藏过程中风味品质调控提供理论依据和借鉴。

关键词: 杏仁; 香气物质; 热加工; 贮藏; 异味

Research Progress on Aroma Compounds in Almonds and Factors Influencing Its Flavor Quality

CHEN Chen¹, ZHOU Jie¹, ZHOU Qi², LOU Xinman¹, YU Haiyan¹, YUAN Haibin¹, TIAN Huaixiang^{1,*}

(1. School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. Key Laboratory of Oilseeds Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China)

Abstract: Raw almonds are rich in aldehydes, alcohols and other odorants contributing to fresh fruity and hay-like aromas. The flavor of almonds can change significantly due to various chemical reactions during thermal processing and storage, which can greatly affect its flavor quality. In this context, this review summarizes the major aroma compounds in raw almonds and the major aroma compounds formed by the Maillard reaction, the oxidation of fatty acids, and the degradation of amino acids and soluble sugars in roasted almonds, and it compares the effects of different thermal processing methods and conditions on the aroma compounds and aroma properties of almonds. In addition, this review summarizes the changes of the major aroma compounds and off-odor compounds in almonds during storage and the rational storage methods and conditions. Finally, possible future directions for research on almonds and other nuts are outlined. This review could provide a theoretical basis and reference for flavor quality control of almonds and other nuts during thermal processing and storage.

Keywords: almonds; aroma compounds; thermal processing; storage; off-odor

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220905-053

中图分类号: TS255.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)19-0320-10

引文格式:

陈臣, 周洁, 周琦, 等. 杏仁中的香气化合物及其风味品质影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 320-329.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220905-053. <http://www.spkx.net.cn>

CHEN Chen, ZHOU Jie, ZHOU Qi, et al. Research progress on aroma compounds in almonds and factors influencing its flavor quality[J]. Food Science, 2023, 44(19): 320-329. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220905-053. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 农业农村部油料加工重点实验室开放基金资助项目(202103)

第一作者简介: 陈臣(1982—)(ORCID: 0000-0002-4885-393X), 男, 教授, 博士, 研究方向为乳品科学与技术及食品生物技术。E-mail: chenchen@sit.edu.cn

*通信作者简介: 田怀香(1976—)(ORCID: 0000-0002-6097-809X), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: tianhx@sit.edu.cn

杏仁是一种具有较高感官评分和营养价值的果仁，烘焙后风味更加丰富诱人，口感更酥脆，是世界上品质最佳的食用干果之一。根据联合国粮食及农业组织的数据，近年来杏仁在全球坚果产量中排名第二^[1]。成分研究表明，杏仁中脂肪质量分数约为44%~61%，包括油酸（C_{18:1}，62%~80%）、亚油酸（C_{18:2}，10%~18%）、棕榈酸（C_{16:0}，0.5%~8.0%）等，蛋白质量分数约为16%~23%，含有大部分必需氨基酸，以及限制性氨基酸（赖氨酸、甲硫氨酸和半胱氨酸）^[2]。长期食用杏仁可达到降血压、降血脂和预防心脑血管疾病等效果^[1]。

杏仁的香气是评价其品质的重要指标之一，主要受热加工和贮藏条件等因素的影响。生杏仁主要香气特点为青香和新鲜水果味，经热加工处理后产生较浓郁的焦糖、烘烤香和奶香。研究表明，脂肪酸、碳水化合物、氨基酸或多肽是形成杏仁香气的重要前体物质（图1），随着研究的深入和分析检测仪器的不断发展，从杏仁中检测出的化合物种类逐渐增多，主要包括通过美拉德反应、糖降解、氨基酸降解、脂肪酸氧化等反应^[3]产生的醛类、醇类、酯类、吡嗪类、萜烯类、含氮化合物和含硫化合物等气味活性物质，提升了杏仁的整体香气和感官品质。然而在贮藏过程中，良好的香气物质会通过挥发或者氧化反应等途径而损失，并且随着贮藏时间的延长，氧化程度不断加深，形成更多的脂肪型异味物质，如哈喇味。因此，研究生、熟杏仁及其在贮藏过程中的重要气味化合物的种类和含量变化规律可以为杏仁等坚果类食品的加工技术和贮藏方法的改进提供参考和研究基础。

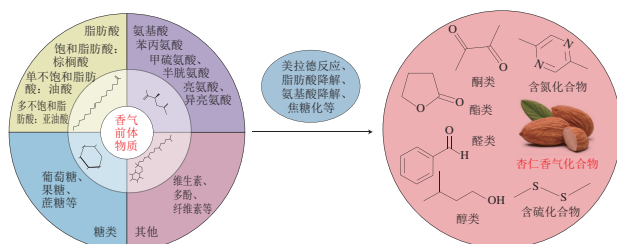


图1 杏仁挥发性香气物质及其前体物质

Fig.1 Volatile aroma compounds and their precursors in almonds

本文综述生、熟杏仁的重要香气物质，总结熟杏仁香气物质形成的主要途径，并比较不同热加工方式及处理条件对杏仁产生关键香气化合物及其气味属性的影响，概述贮藏期香气化合物或异味化合物组成和含量变化情况，并对未来研究方向与思路做出了展望，以期对杏仁等坚果的合理加工和贮藏提供科学的指导。

1 杏仁中的香气化合物

香气化合物的组成和含量是形成杏仁风味的重要因素之一，同时对消费者偏好有很大影响。生杏仁的香气源于生长和成熟阶段产生的挥发性气味化合物的累积，

而热加工后杏仁的香气主要源于热加工过程中化学反应产生的低嗅觉阈值气味物质间的相互作用（气味活性值（odor activity value, OAV）≥1说明可能对杏仁香气有贡献）。目前，对香气物质的提取方法主要有液-液微萃取（liquid-liquid microextraction, LLME）、分散液-液萃取（dispersive liquid-liquid extraction, DLLE）、搅拌棒吸附萃取（stir bar sorptive extraction, SBSE）、顶空固相微萃取（headspace solid phase microextraction, HS-SPME）^[1,4]和溶剂辅助蒸馏萃取（solvent assisted flavor evaporation, SAFE）^[5-6]等，其中HS-SPME和SAFE法是最常用的萃取方法。检测技术主要包括气相色谱-质谱联用（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）^[4,7]和气相色谱-嗅闻（gas chromatography-olfactometry, GC-O）^[5,8]等。不同的研究者对生杏仁和热加工杏仁中鉴定出的香气化合物的类别虽大体相似，但所报道的化合物相对含量差异却较大^[5,9-16]，这可能与杏仁的品种、成熟度、不同热加工方式以及氧化程度等因素有关。

1.1 生杏仁中的重要香气化合物

生杏仁的香气主要受遗传、籽粒成熟程度和生长环境等因素的影响^[17]。苯甲醛是生杏仁关键香气化合物之一^[9,12,15-16]，具有苦杏仁味且气味阈值相对较低（水中阈值：0.35 mg/L）。杏仁中的杏仁苷（二糖苷）压碎或嚼碎后与水或唾液接触可以分解成氰化氢和苯甲醛^[18]。通常苦杏仁中苯甲醛含量较高（质量分数约高于3%），同时Moayedi等^[19]比较了甜、半苦和苦杏仁中苯甲醛含量差异，发现杏仁中具有苦味的苯甲醛与杏仁苷之间的强相关性，所以商业上常以苯甲醛含量为指标之一筛选出优质甜杏仁种植^[7,20-21]。除了苯甲醛外，其他醛类也被广泛报道^[9,11-14]，例如脂肪酸降解产生的壬醛、庚醛和己醛等气味物质，同时它们的气味阈值相较生杏仁中的其他化合物低^[15]，对生杏仁的香气贡献相对显著。

生杏仁香气化合物中的醇类可以通过脂肪酸降解和氨基酸酶脱氨和脱羧产生^[5,22-26]，如2-甲基-1-丙醇、3-甲基-1-丁醇，以及具有花香味的2-苯乙醇等支链醇^[27]，并且Valdés等^[15]检测发现Alicante品种（产地西班牙）生杏仁中3-甲基-1-丁醇和1-己醇是含量最多的醇。Xu Lirong等^[28]研究发现1-戊醇和1-辛醇的含量随着氧化作用的增强而有所增加。生杏仁中还被检测到少量酮类，如脂肪酸氧化产生的2,3-戊二酮等。生杏仁中吡嗪类香气物质很少会被检测到，除了具有坚果、咖啡和花生酱气味的2,5-二甲基吡嗪^[9]。此外，Schwab等^[29]比较多个杏仁品种后发现某些品种生杏仁中可以检测到或仅检测到微量的具有异戊烷烃的骨架萜类化合物，例如缬烯和柠檬烯，可以为生杏仁赋予新鲜果香。表1总结了生杏仁中的重要香气物质及其代谢途径。

表1 生杏仁中重要香气物质及其代谢途径和香气属性

Table 1 Important aroma compounds, aroma properties and metabolic pathways of raw almonds			
重要香气物质	代谢途径	香气属性	参考文献
醛类	苯甲醛	苯丙氨酸降解	苦杏仁味 [18]
	戊醛	脂肪酸氧化	发酵、成熟的水果味 [11]
	壬醛	脂肪酸氧化	黄瓜、柠檬皮、脂肪味 [12]
	己醛	脂肪酸氧化	脂肪、青草、干草味 [9]
醇类	1,2-丙二醇	环氧丙烷降解	微甜味 [9]
	1-戊醇	亚油酸降解	刺激性 [28]
	2-苯乙醇	氨基酸酶脱氨和脱羧	玫瑰香 [9]
	1-己醇	脂肪酸氧化	水果香 [15]
酮类	1-辛醇	脂肪酸氧化	青草、柑橘、玫瑰香 [30]
	2,3-戊二酮	脂肪酸降解	奶油、焦糖味 [31]
	2-辛酮	脂肪酸氧化	发霉味、蓝奶酪味、蘑菇味 [23]
	2-庚酮	脂肪酸氧化	水果、蓝奶酪味、椰子香 [23]
吡嗪类	2,5-二甲基吡嗪	美拉德反应	可可粉、烤坚果、烤牛肉味 [9]
萜烯类	α -蒎烯、柠檬烯		新鲜果香 [27]

1.2 熟杏仁中的关键香气物质

通常杏仁等坚果在热加工后食用，此过程既提高了感官质量^[32]、消化率^[33]和安全性^[34]，又可产生更多的香气化合物，如醛类、醇类、酯类、酮类、含硫化合物、呋喃类、含氮化合物和内酯等，使杏仁风味更丰富、诱人。此过程中重要的香气化合物及其主要代谢途径和香气属性见表2。杏仁热加工过程与产生风味有关的反应主要为美拉德反应、氨基酸降解和脂肪酸降解。

表2 熟杏仁产生的重要香气化合物及其代谢途径和香气属性

Table 2 Important aroma compounds, aroma properties and metabolic pathways of roasted almonds			
熟杏仁香气物质	代谢途径	香气属性	参考文献
苯甲醛	苯丙氨酸降解	苦杏仁味	[10,35]
苯乙醛	苯丙氨酸降解	花香、蜂蜜味	[5]
癸醛	油酸降解	水果、肥皂味	[7]
壬醛	油酸降解	玫瑰香、柑橘、脂肪味	[36]
(E)-2-庚醛	亚油酸降解	辛辣、刺激的草本质	[37]
(E)-2-壬烯醛	亚油酸降解	干草、花卉味	[38]
2-甲基丙醛	缬氨酸降解	果香、巧克力味	[22]
2-甲基丁醛	异亮氨酸降解	奶酪、水果、可可、麦芽味	[22]
3-甲基丁醛	亮氨酸降解	果香、巧克力、脂肪味	[22]
己醛	亚油酸降解	青草味、叶香、木香	[39]
糠醛	果糖和葡萄糖降解	烤面包香、焦糖味	[9,15]
(Z)-3-己烯-1-醇	亚麻酸氧化	绿草、绿叶味	[40]
1-辛烯-3-醇	亚油酸热分解	蘑菇、草本质	[37]
1-丁醇	亚麻酸降解	未成熟的苹果香	[10]
2-苯乙基乙醇	苯丙氨酸脱羧	花香	[27]
3-甲基-1-丁醇	氨基酸脱氨和脱羧形成	刺激气味	[7,27]
糠醇	葡萄糖热降解	焦糖、烤面包、咖啡味	[9]
2-甲基丁醇	异亮氨酸美拉德反应	巧克力味	[15]
3-甲基丁醇	亮氨酸美拉德反应	麦芽香味	[15]
2,3-戊二酮	美拉德反应	奶油、黄油、焦糖味	[5]
2,3-丁二酮	美拉德反应	黄油、奶酪、甜味	[1]
3-羟基-2-丁酮	美拉德反应	黄油、奶油、牛奶、脂肪味	[22]
呋喃酮	果糖热降解	水果、焦糖、果酱味	[41]

续表2

熟杏仁香气物质	代谢途径	香气属性	参考文献
4-羟基-2,5-二甲基-3-(2H)-呋喃酮	果糖和葡萄糖降解	草莓、焦糖味	[5]
2,3,5-三甲基吡嗪	美拉德反应	烘烤、坚果香	[5,9,22]
2-甲基吡嗪	美拉德反应	坚果、可可、巧克力、烤花生、爆玉米味	[5,9,22]
2-乙基吡嗪	美拉德反应	花生酱、坚果、焙烤可可味	[5,9,22]
2,6-二甲基吡嗪	美拉德反应	可可、焙烤坚果、咖啡味	[5,9,22]
3,5-二甲基-2-乙基-吡嗪	美拉德反应	坚果、花生酱香气，类似泥土味、香草味	[42]
2,5-二甲基吡嗪	美拉德反应	烤面包、烤坚果香气，可可味	[9,42]
吡咯类	2-乙酰基吡咯	美拉德反应	焦糖香 [5]
吡啶类	2-乙酰基吡啶	美拉德反应	烘烤、爆米花香 [5]
内酯类	γ -丁内酯	醛类氧化	奶香、奶油香 [10]
含硫化合物	二甲基二硫醚	甲硫氨酸降解	新鲜洋葱味 [22]
	3-甲硫基丙醛	甲硫氨酸降解	烤土豆味 [5]
咪唑类	2-戊基咪唑	亚油酸降解	鲜果味、豆香、青香 [9]

1.2.1 美拉德反应

美拉德反应是杏仁经过热加工产生香气物质最重要的反应之一^[43]，由蛋白质或肽水解产生的游离氨基酸与还原糖形成杂环气味化合物^[15]，且美拉德反应产物的OAV通常较高，如3-甲硫基丙醛^[1]。吡嗪类是美拉德反应产生的主要香气化合物之一，与熟杏仁气味呈较高正相关^[41]，由氨基酸和 α -二羰基化合物缩合形成的醛是吡嗪类物质的前体^[9]，其中2,5-二甲基吡嗪通常是新鲜烘烤的坚果中含量较高的香气物质^[5]。吡嗪类的气味阈值通常随着烷基数量的增加和烷基中碳原子数的增加而降低，气味阈值主要依赖于基团位置，除了2-甲基吡嗪（水中阈值：0.06 mg/L）的气味阈值较低^[9,15]，其他含有1~4个甲基的吡嗪类的气味阈值都相对较高，而乙基取代一个或多个甲基可以显著降低气味阈值，例如2-乙基-5-甲基吡嗪（水中阈值：0.10 mg/L）和2-乙基-6-甲基吡嗪（水中阈值：0.13 mg/L）^[44]。低阈值的吡嗪类物质对香气的影响较大，可以为熟杏仁增添坚果、烤面包、可可和花生酱的香气^[9]。吡咯类、吡啶类及其衍生物通常产生爆米花味、焦糖、烟熏和焦香^[45]，这些化合物的含量随加工时间的延长、温度的升高而显著增加，而且与烘焙的香气具有一定的相关性^[44]。美拉德反应还会产生其他类化合物，Garcia等^[1]发现了3-羟基-2-丁酮、2,3-丁二酮等酮类香气物质，Xiao Lu等^[9]检测到了2-甲基-1-丙醇、3-甲基-1-丁醇和2-苯乙醇等醇类香气化合物。同时美拉德反应还会产生烘焙食品特有的棕红色等色泽^[41,46]，可刺激食欲。杏仁的美拉德反应通常伴随着焦糖化，糖降解是焦糖化的重要反应之一，可以产生焦糖香气。果糖和葡萄糖的热降解产生呋喃及含呋喃衍生物是最为常见的糖降解产香途径，产物具有巧克力、焦糖、面包、甜水果和坚果等香气。

1.2.2 氨基酸降解

氨基酸降解产生的挥发性香气物质对风味特性起着重要作用。1) 芳香族氨基酸, Hidalgo等^[47]发现苯丙氨酸脱羧形成了具有花香的物质苯乙醛和苯甲醛及其醇、酸的衍生物。Tieman等^[27]也发现苯丙氨酸形成一些花香前体物质, 如2-苯乙醇和苯乙醛。2) 支链氨基酸, 还原糖降解产生的二羰基化合物与亮氨酸^[48]、异亮氨酸和缬氨酸通过转胺和脱羧分别生成了支链醛如3-甲基丁醛、2-甲基丁醛和2-甲基丙醛, 分别具有果香味、奶酪味和可可味。Huang Yarong等^[49]根据空间结构对比发现亮氨酸的降解速度比异亮氨酸快, 与葡萄糖或麦芽糖的反应亮氨酸比异亮氨酸更活跃, 并且Bi Hongxia等^[48]研究发现3-甲基丁醛可以在相对较低温度下反应生成, 即相同条件下熟杏仁更易生成3-甲基丁醛。氨基酸降解同时生成具有麦芽香、巧克力味的3-甲基丁醇和2-甲基丁醇^[22]等醇类。2-甲基丁醇和3-甲基丁醇在多个品种的熟杏仁中被检测到^[9,15,50], 且他们在水和油中的阈值都很低, Erten^[5]和Vázquez-Araújo^[37]等在部分品种的杏仁中发现他们具有超阈值浓度。3) 含硫氨基酸, 半胱氨酸和甲硫氨酸降解产生含硫气味化合物, 通常具有较低阈值且具有大蒜、洋葱、煮肉味等特殊气味^[51]。Garcia^[1]和Chetschik^[52]等发现有的坚果会产生含硫化合物3-甲基硫丙醛和具有类似咖啡气味的化合物2-呋喃甲硫醇^[53]。二甲基硫化物气味强烈, 具有新鲜洋葱的味道, 例如Franklin等^[22]发现甲硫氨酸

可以通过美拉德反应形成具有大蒜或卷心菜气味的二甲基二硫醚^[22], 在低浓度时可以与其他低阈值气味化合物结合产生独特的烘烤味。刘英丽等^[51]发现含硫化合物与3-甲基丁醛反应可产生类似培根的香气。

1.2.3 脂肪酸降解

脂肪酸氧化降解也是杏仁热加工产生挥发性香气成分的重要途径之一, 作为香气化合物的重要前体, 其碳8、9、10、11的4个位置中的任何一个位置都易于被氧化, 产生氢过氧化物并分解生成醛类、酮类和醇类等气味化合物^[46,54], 产生烘烤的味道。多于6个碳原子的醛一般来源于油酸和亚油酸等不饱和脂肪酸的氧化, 而且产物的气味阈值通常较低^[28]。己醛也是脂肪酸降解产物中含量较高的、最主要的醛类之一, 低浓度时被描述为青草味, 其含量可作为反映脂肪酸氧化程度的指标之一。壬醛是油酸降解产生的主要醛类^[23]。低浓度的戊醛、庚醛、辛醛和癸醛等化合物分别具有脂香、奶香、鲜草香和甜香^[1]。醇类既可以由脂肪酸的氢过氧化物分解产生, 例如Xu Lirong等^[28]检测到了由亚油酸降解产生的1-戊醇, 也可以由醛类通过醇脱氢酶转化为醇类或其他脂质氧化物(γ -丁内酯)^[10]。Agila等^[10]研究发现在热加工杏仁过程中, 美拉德反应产生的香气物质含量高于脂质氧化产生的香气物质, 但是美拉德反应产生香气活性物质需要更高的反应温度或更长的加工时间^[55]。

杏仁香气物质产生途径如图2所示。

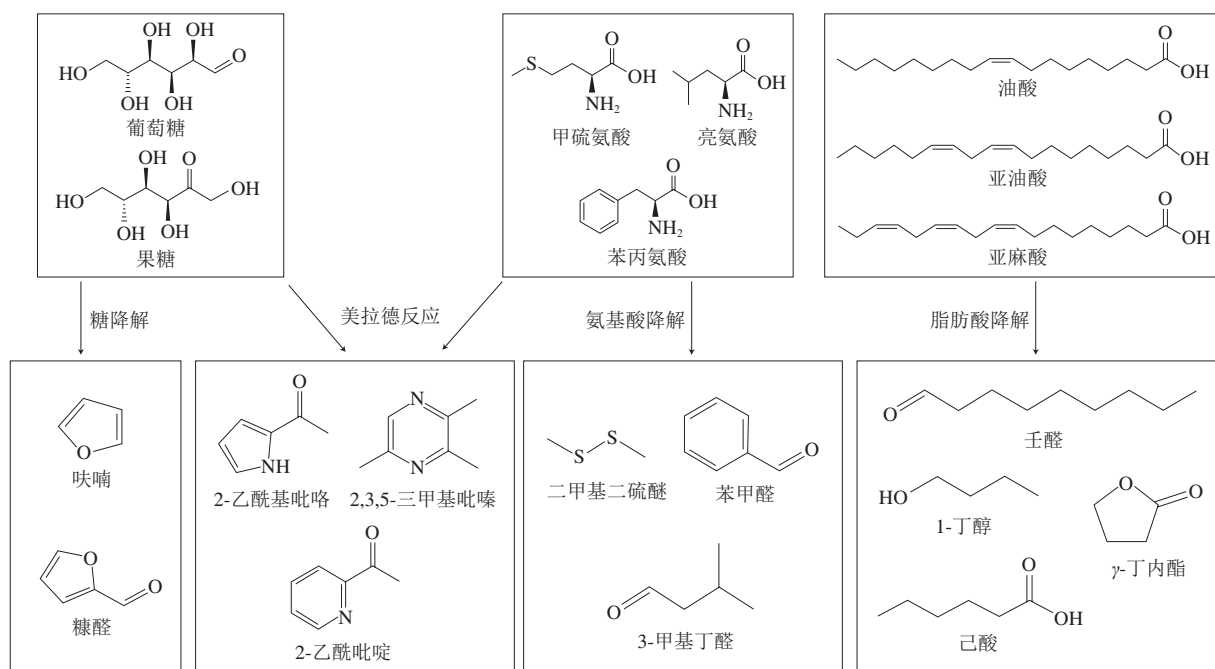


图2 杏仁香气物质产生途径

Fig. 2 Production pathways of aroma compounds in almonds

2 热加工方式对香气的影响

杏仁的热加工方式主要有热风烘烤、微波、红外和油炸等(图3),其中最传统的热加工方式是热风烘烤。杏仁经过热处理其水分含量和水分活度降低,在短时间内有利于杏仁的贮存,不易受微生物的污染,同时使杏仁质地变得更脆,提升了感官品质。热加工处理的时间和温度等条件,以及是否使用脂质作为介质进行传热(例如油炸)都会影响产生的化合物的组成和含量。根据文献总结了常见热加工方法中生成的新重要香气物质,见表3。

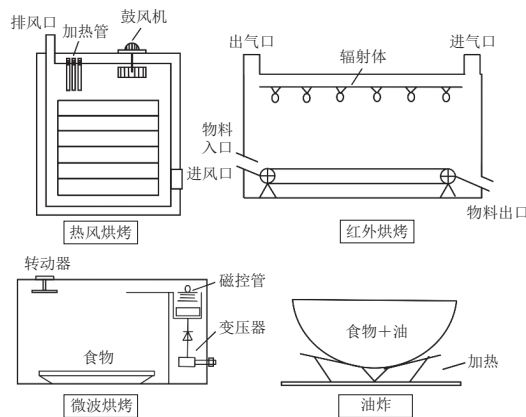


图3 常见杏仁热加工方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of common thermal processing methods for almonds

表3 不同热加工方式中杏仁新生成的重要香气物质

Table 3 Newly formed important aroma compounds of almonds subjected to different thermal processing methods

加工方式和参数	新生成的重要香气物质	参考文献
177 °C, 5 min	苯醇、1-辛烯-3-醇、甲苯、2,5-二甲基吡嗪、1-丁醇、2,3,5-三甲基吡嗪、2-甲基吡嗪	[10]
170~190 °C, 5~10 min	2-甲基-1-丁醛、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、糠醛	[15]
热风烘烤 190 °C, 10 min	2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪	[41]
138 °C, 33 min	3-甲基-1-丁醇、苯乙醛、2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、庚醛、1-丙醇、2-庚酮	[7]
138 °C, 28, 33, 38 min	2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、糠醛、2-苯基乙醛	[9,56]
热风-射频烘烤 120~130 °C, 15 min	2,5-二甲基吡嗪、甲苯、庚醛	[45]
热风-红外烘烤 130, 140, 150 °C, 5, 11, 21 min	苯乙醛、2,5-二甲基-3-乙基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、糠醛、壬醛	[57]
红外烘烤 130, 140, 150 °C, 4, 6, 11 min	苯乙醛、2,5-二甲基吡嗪	[57]
微波烘烤 120 V, 1~3 min	苯醇、甲硫基丙醛、2,5-二甲基吡嗪、壬醛、1-辛烯-3-醇、 γ -丁内酯	[10]
135 °C, 5 min	苯醇、甲硫基丙醛、1-丁醇、1-辛烯-3-醇	[10]
油炸 160~200 °C, 10~15 min	2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、2,5-二甲基吡嗪、1-戊醇	[15]

2.1 热风加工

热风烘烤常见温度范围为130~155 °C,烘烤时间为10~50 min,轻度或中度烘烤的杏仁通常已经具有良好的感官品质^[43],Pastorelli等^[39]发现轻度烘烤后坚果具有未成熟的水果气味,例如己醛的衍生物顺式3-己烯醛和己醇,它们的前体物质是亚麻酸或亚油酸。Ghaderi等^[58]

研究发现140~150 °C温度范围更有利于美拉德反应的发生,Xiao Lu等^[9]检测发现150 °C烘烤的*Prunus dulcis*杏仁与生杏仁的香气比较接近,具有甜味和新鲜果香,而170 °C烘烤的杏仁,醛类物质含量高,具有坚果味、巧克力、烤面包味和醛香。Lipan等^[41]认为170 °C更有利于烘烤Vairo杏仁,其中2,5-二甲基吡嗪和糠醛为主要特征挥发性化合物,而190 °C烘烤杏仁具有烧焦味、苯甲醛味和烘烤味,被认为烘烤过度。美拉德反应产生的挥发性气味物质多为吡嗪类和呋喃类,例如吡嗪(2,5-二甲基-3-乙基吡嗪、2,3-二甲基-5-乙基吡嗪)和呋喃衍生物(呋喃酮)。热风烘烤的杏仁富含醛类、醇类和含硫化物^[10],另外,Liao Meiji等^[59]检测发现呋喃类、吡咯类、吡嗪类和芳香族醛类等香气化合物的浓度随烘烤时间的延长而增加,而且烘烤温度越高,浓度上升得越快,特别是美拉德反应产生的香气化合物。虽然热风烘烤是最常见的坚果热处理方式,但此方法耗时、耗能,而且高温烘烤的产品不易贮藏^[60],同时苦味、涩味、烤焦、烧焦和木质等气味属性的强度较高,且甜度则随着温度的升高而显著降低^[41]。

2.2 微波加热

微波加热处理方式具有运行快速、加工时间短、节能和调控精确等优点^[61],已被用于杏仁和开心果等坚果的加工^[10,62]。微波加热可以提高香气活性化合物产生的含量,其总增加含量与微波烘烤的时间和功率呈正相关。Kiralan等^[63]研究发现微波处理比热风烘烤更有利于美拉德反应的发生,可以在更短时间内产生更多的香气活性物质,特别是具有烘烤香气的吡嗪类,并且Agila^[10]和Milczarek^[64]等认为与微波烤杏仁的感官评价相比,油炸和热风烘烤杏仁的香气强度更强,是杏仁加工的最佳方式之一。Zhou Ye等^[61]发现微波预处理约2 min即可产生典型的烘烤香气,并且贮藏期氧化稳定性相对较高。短时间微波其脂肪酸的不饱和度无显著变化,而随着处理时间的增加,抗氧化活性物质含量显著降低,而氧化稳定性略微提高,这可能是由于美拉德反应产生了类黑精。

2.3 油炸加工

油炸杏仁中醛类、吡嗪类和醇类是主要的香气物质^[10,15],高温条件下也会通过美拉德反应和糖降解形成更多种类和更高浓度的含氮化合物^[5]。Erten等^[5]在油炸杏仁中检测到了4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮(草莓、焦糖味)、2,3-戊二酮(黄油、焦糖味)、2-乙酰基-1-吡咯(烤肉、爆米花味)和甲基丙基二硫醚(大蒜味)等香气化合物。油炸有利于含硫气味物质对感官品质的提升,二甲基硫化物与油作用产生新鲜洋葱的气味。但油炸杏仁的挥发物含量明显低于其他加工方法^[65],Agila^[10]和Gong Yi^[65]等认为可能是部分挥发物溶解于油中,但随着油温的升高,也更易形成美拉德反应和糖类降解产物^[5]。采用不同的油油炸也会影响香气物质的组成

和含量, 由于不同油的成分、比热容等性质的差异, 导致传导到杏仁的温度也略有差异。但是油炸过程中游离氨基酸天冬酰胺的氨基与葡萄糖或果糖的羰基之间通过热诱导的美拉德反应会形成潜在毒性物质——丙烯酰胺、多环芳烃等^[10], 且浓度会随温度和时间增加而显著增加。

2.4 复合热加工

杏仁热加工中常见复合热加工方式有热风-红外烘烤和热风-射频烘烤。Yang Jihong等^[57]研究发现热风-红外烘烤与单一的红外烘烤产生的香气活性化合物相比有较大的差异, 特别是吡嗪类的含量。但与热风烘烤相比, 具有加工时间短、生产成本低等优势^[45]。射频是一种新型的热处理技术, 通过内部分子摩擦产生的热量加热食品, 具有加热快速、穿透性强和加热相对均匀等特性^[45,66]。而且射频加热可以在较低的温度下即可获得热风烘烤或者油炸杏仁产生的部分气味良好的化合物^[1,67], 目前已经被应用于杏仁、腰果等多种坚果中^[45,68]。Xu Yuanrong^[45]和Liao Meiji^[59]等都认为相同热加工条件下, 热风-射频烘烤与热风烘烤杏仁的消费者整体接受度没有显著差异, 但是热风-射频烘烤杏仁比热风烘烤可以使杏仁产生更好的香气和颜色, 同时Xu Yuanrong等^[45]还认为热风-射频烘烤能更有效地降低杏仁内部含水量, 从而延长贮藏期。此外, 射频技术也是一种潜在的替代巴氏杀菌并且可以降低食品水分的方法^[69], 未来在杏仁加工和贮藏领域都有巨大的潜力。

综上所述, 不同热加工方式或参数处理杏仁产生的香气物质略有差异, 微波烘烤杏仁的感官评价比油炸和热风烘烤的香气强度更强, 是最佳的杏仁加工方式之一。此外, 传统热加工方式通常有耗时、耗能等缺点, 因此研究具有低耗能、加热快的射频等新兴热加工技术与传统热加工方式的结合应用, 有利于提高杏仁等坚果的工业化加工效率。同时热加工也要注意处理的方式、条件和程度, 过度热加工既不利于产品的感官特性, 又易产生有害物质。

3 贮藏对熟杏仁气味的影响

由于杏仁含有大量不饱和脂肪酸和其他不饱和脂质(如胆固醇和甾醇等), 极易自然氧化分解形成氢过氧化物, 最终产生小分子醛、酮和酸等物质, 导致气味、口感、颜色和营养等品质劣变, 甚至产生有毒化合物进而影响食品安全。影响杏仁脂质氧化的因素涉及杏仁自身脂肪酸的组成和含量及成熟度、热加工程度以及贮藏的温度/湿度和氧气/光照环境条件等因素, 其中温度和时间对杏仁香气影响较为明显。若贮藏不当会造成杏仁的挥发性香气化合物的损失, 此外, 氧化酸败也会导致异味的产生。

3.1 香气物质损失

较长时间和较高温度贮藏会使杏仁热加工产生的大量挥发性香气物质损失甚至消失, 造成杏仁感官品质的变化。研究表明, 热加工通常会使醛类、支链醇类、吡嗪类、杂环类和含硫化物等香气物质的浓度增加^[9], 随贮存时间的延长这些香气化合物含量显著减少, 特别是美拉德反应产生的吡嗪类和呋喃类等物质^[30,70]。Lee等^[56]通过对比烤杏仁在25℃或35℃、65%相对湿度的黑暗环境贮藏, 研究评估24周内贮藏温度和贮藏时间对轻度烘烤(138℃、28 min)和重度烘烤(138℃、38 min)杏仁中总挥发性化合物的影响, 研究发现在相同的烘焙程度和贮藏温度条件下, 贮藏初期气味化合物总含量显著下降, 贮藏较长时间后下降速度减缓, 同时贮藏温度越高, 香气物质损失越多。硫化物(1-甲硫基-2-丙醇和2-乙硫基乙醇)、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、糠醛、2-苯基乙醛、2,3-丁二酮和2-甲基吡嗪等物质在贮藏阶段含量显著减少^[56]。具有新鲜水果气味的酯类化合物在长时间贮存后也几乎检测不到^[23]。此外, Valdés等^[15]研究发现贮藏较短时间醛类物质含量显著下降。

3.2 异味物质产生

食品中由于不饱和脂肪酸氧化降解而产生的不愉快的异味称作氧化酸败^[71-72], 此过程产生的挥发性气味物质在长期贮藏后占主导。但是由于氧化程度的检测差异, 只有在产生较严重的异味后才会发现氧化酸败, 影响食用安全。水分含量较高的杏仁其糖类、蛋白质和脂质氧化程度更明显^[73]。

贮藏过程中杏仁醛类化合物的浓度变化较为显著, 例如戊醛、己醛、庚醛和壬醛等醛类^[74], 通常是油酸和亚油酸在常温条件下氧化产生的二级氧化产物C₅~C₁₁的醛类, 浓度较高时通常具有青草、金属和腐败的气味^[24]。Yang Jihong^[57]和Warner^[75]等认为坚果风味劣变的其中一个原因是脂质氧化产生的醛类对吡嗪类(2,6-二甲基吡嗪、2-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基或6-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪等)等香气物质具有掩盖作用, 因为较短的贮藏期内吡嗪类浓度没有显著降低, 但香气感官评价降低。Xu Lirong等^[28]研究发现随着贮藏时间的延长, 气味良好的醛类物质含量降低, 而不良气味化合物含量增加, 例如, 亚油酸氧化形成己醛、2-庚烯醛、2-辛烯醛和壬醛^[22-23,56], 其中己醛具有辛辣、青草和脂肪气味^[1], 2-辛烯醛具有烘烤和脂肪型气味, 2-庚烯醛是鱼腥味^[22]。己醛在常温条件下可以缓慢产生, 是生杏仁中的主要气味化合物之一, 与氧化程度有关^[76-77], 也是最常用的脂质氧化标记物之一。

Franklin等^[30]研究发现在熟杏仁贮存过程中, 2-辛酮、3-辛烯-2-酮和乙酸等化合物浓度显著增加, 也是常见的酸败标志, 同时发现, 与过氧化值和游离脂肪酸值等

氧化程度指标相比, 这些顶空挥发物与消费者喜厌的相关性更强。杏仁长时间贮藏会产生其他类异味化合物, 例如, 亚油酸降解产生己酸^[22]、1-辛烯-3-醇、1-戊醇和己醇等, 其中己酸具有强烈的山羊味、汗味和干酪味, 1-辛烯-3-醇气味阈值较低, 具有蘑菇、泥土和草本气味^[26], 与异味具有强相关性, 且其浓度随着氧化程度增加而增加, 而部分香气化合物的含量在长时间贮藏后会增加, 如1-庚醇和1-辛醇^[77]。可以通过调控杏仁贮藏期的氧气接触量、含水量、温度及环境等方式抑制氧化酸败, Raisi等^[78]研究了黑暗条件下温度和空气对杏仁香气的影响, 结果表明杏仁在低温和真空条件下具有更长的保质期。

上述研究表明熟杏仁感官品质劣变的主要原因是大量香气化合物在长期贮藏过程被掩盖或者损失, 以及脂肪酸过度氧化产生的异味化合物, 所以针对杏仁等坚果及其衍生产品的贮藏既要避免香气物质的损失, 也要避免或抑制过度氧化形成异味的途径, 调控手段包括: 1) 使用新型热加工技术, 如红外技术、射频技术和微波技术等结合传统热加工方法, 在较低温度条件下烘烤杏仁以获得良好的风味, 能在一定程度上抑制杏仁氧化劣变的速度^[45]; 2) 利用现代保藏技术, 如干燥^[79-80]、香气控释技术^[81]、食品冷杀菌保鲜包装^[82]、惰性气体保鲜技术^[83] (如氮气)、真空包装^[84]、气调保藏^[85] (如纳米纤维素复合膜^[86]和细菌纤维素膜^[87])等; 3) 控制贮藏条件 (环境的温度、湿度、光照和通风等条件)。

4 结 语

具有良好风味的杏仁在食品工业中具有广泛应用, 其风味品质是影响消费者购买意向的主要因素, 而不同热加工处理方式和贮藏都会对其气味产生巨大影响。本文总结了近年来文献中研究者们对生杏仁和熟杏仁及其贮藏过程中检测到的主要气味物质及气味物质产生的影响因素, 以期杏仁等坚果良好香气品质的获得和保持提供科学依据。

为了满足消费者对杏仁等坚果食品安全和风味的需求, 可以在目前的基础上展开如下研究。其一, 不同产地和品种的杏仁不仅存在成分差别, 而且经热加工处理后引起的风味变化也有差异, 因此可以建立不同产地或者品种的杏仁风味指纹图谱以区分杏仁; 可以针对不同加工方式处理后杏仁的风味物质和感官评价的差异, 建立一个感官评价体系以评估热加工方式对杏仁风味的潜在影响, 并对不同品种或类型的坚果的热加工方法进行改良。其二, 目前已有文献对热加工后的风味物质进行分析和鉴定, 但是缺乏对于熟杏仁香气化合物间相互作用以及油炸时不同油基质的传热等性质和香气物质

释放程度等因素对杏仁风味的影响研究, 需要在上述领域开展研究。其三, 研究过程中还应关注异味组分的生成和变化, 确定杏仁油脂氧化降解过程中形成的异味化合物的组成和含量的变化, 开发一种针对异味化合物的快速、准确的定量分析方法, 达到确定杏仁氧化程度和提供坚果食用参考的目的, 形成杏仁等坚果类食品加工、贮藏的行业标准草案。综上, 在后续的研究中, 可以从杏仁的特征风味物质及异味组分的产生机制等方面研究风味调控的途径, 以期杏仁等坚果的品种选育、风味调控、产品开发以及贮藏方式和条件的选择提供参考, 促进杏仁产品在食品工业中的应用。

参考文献:

- [1] GARCIA A V, ROMERO R S, POLO A J, et al. Volatile profile of nuts, key odorants and analytical methods for quantification[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1611. DOI:10.3390/foods10071611.
- [2] SANAHUJA A B, SANTONJA M B, TERUEL N G, et al. Classification of almond cultivars using oil volatile compound determination by HS-SPME-GC-MS[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2011, 88(3): 329-336. DOI:10.1007/s11746-010-1685-8.
- [3] FRANKLIN L M, MITCHELL A E. Review of the sensory and chemical characteristics of almond (*Prunus dulcis*) flavor[J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2019, 67(10): 2743-2753. DOI:10.1021/acs.jafc.8b06606.
- [4] SANAHUJA A B, PÉREZ S E M, TERUEL N G, et al. Variability of chemical profile in almonds (*Prunus dulcis*) of different cultivars and rignins[J]. *Foods*, 2021, 10(1): 153. DOI:10.3390/foods10010153.
- [5] ERTEN E S, CADWALLADER K R. Identification of predominant aroma components of raw, dry roasted and oil roasted almonds[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 244-253. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.08.091.
- [6] 杨彩虹, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 基于HS-SPME-GC-MS和OAV分析黄山地区不同茶树品种红茶香气的差异[J]. *食品科学*, 2022, 43(16): 235-241. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210726-301.
- [7] OLIVEIRA I, MALHEIRO R, MEYER A S, et al. Application of chemometric tools for the comparison of volatile profile from raw and roasted regional and foreign almond cultivars (*Prunus dulcis*)[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(8): 3764-3776. DOI:10.1007/s13197-019-03847-x.
- [8] 刘子豪, 王笑园, 傅晓, 等. SPME-GC-MS与SPME-GC-O协同鉴定菇娘果关键香气成分[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 296-303. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210726-306.
- [9] XIAO Lu, LEE J, ZHANG Gong, et al. HS-SPME GC/MS characterization of volatiles in raw and dry-roasted almonds (*Prunus dulcis*)[J]. *Food Chemistry*, 2014, 151: 31-39. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.11.052.
- [10] AGILA A, BARRINGER S. Effect of roasting conditions on color and volatile profile including HMF level in sweet almonds (*Prunus dulcis*)[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 77(4): C461-C468. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02629.x.
- [11] MANZANO P, DIEGO J C, BERNAL J L, et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with static headspace sampling to analyze volatile compounds: application to almonds[J]. *Journal of Separation Science*, 2014, 37(6): 675-683. DOI:10.1002/jssc.201301278.
- [12] MEXIS S F, BADEKA A V, CHOULIARA E, et al. Effect of γ -irradiation on the physicochemical and sensory properties of

- raw unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(1): 87-92. DOI:10.1016/j.ifset.2008.09.001.
- [13] MEXIS S F, KONTOMINAS M G. Effect of oxygen absorber, nitrogen flushing, packaging material oxygen transmission rate and storage conditions on quality retention of raw whole unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 43: 1-11. DOI:10.1016/j.lwt.2009.06.024.
- [14] RAISI M, GHORBANI M, MAHOONAK A S, et al. Effect of temperature and moisture on the development of concealed damage in raw almonds (*Prunus dulcis*)[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2015, 63: 8234-8240. DOI:10.1016/j.jfca.2015.03.004.
- [15] VALDÉS A, BELTRÁN A, KARABAGIAS I, et al. Monitoring the oxidative stability and volatiles in blanched, roasted and fried almonds under normal and accelerated storage conditions by DSC, thermogravimetric analysis and ATR-FTIR[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 117(8): 1199-1213. DOI:10.1002/ejlt.201400384.
- [16] MEXIS S F, BADEKA A V, KONTOMINAS M G. Quality evaluation of raw ground almond kernels (*Prunus dulcis*): effect of active and modified atmosphere packaging, container oxygen barrier and storage conditions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 580-589. DOI:10.1016/j.ifset.2009.05.002.
- [17] ŞAHAN A, BOZKURT H. Effects of harvesting time and irrigation on aroma active compounds and quality parameters of pistachio[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261: 108905. DOI:10.1016/j.scienta.2019.108905.
- [18] YADA S, LAPSLEY K, HUANG G. A review of composition studies of cultivated almonds: macronutrients and micronutrients[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2011, 24(4/5): 469-480. DOI:10.1016/j.jfca.2011.01.007.
- [19] MOAYEDI A, REZAEI K, MOINI S, et al. Chemical compositions of oils from several wild almond species[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(4): 503-508. DOI:10.1007/s11746-010-1701-z.
- [20] KING E S, CHAPMAN D M, LUO K K, et al. Defining the sensory profiles of raw almond (*Prunus dulcis*) varieties and the contribution of key chemical compounds and physical properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(11): 3229-3241. DOI:10.1021/acs.jafc.8b05845.
- [21] VICHI S, MAYER M N, LEÓN-CÁRDENAS M G, et al. Chemical markers to distinguish the homo- and heterozygous bitter genotype in sweet almond kernels[J]. Foods, 2020, 9(6): 747. DOI:10.3390/foods9060747.
- [22] FRANKLIN L M, KING E S, CHAPMAN D, et al. Flavor and acceptance of roasted california almonds during accelerated storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(5): 1222-1232. DOI:10.1021/acs.jafc.7b05295.
- [23] RIBEIRO S R, MACHADORIBEIRO Q, KLEIN B, et al. Effect of low oxygen on quality attributes of 'Barton' pecan nuts after long-term storage at different temperatures[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 263: 109098. DOI:10.1016/j.scienta.2019.109098.
- [24] BELTRÁN A, RAMOS M, GRANÉ N, et al. Monitoring the oxidation of almond oils by HS-SPME-GC-MS and ATR-FTIR: application of volatile compounds determination to cultivar authenticity[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 603-609. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.11.058.
- [25] SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ L, ALI N S, CANO-LAMADRID M, et al. Chapter 18: flavors and aromas[M]// YAHIA E M. Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 385-404. DOI:10.1016/B978-0-12-813278-4.00019-1.
- [26] WANG S, ADHIKARI K, HUNG Y C. Acceptability and preference drivers of freshly roasted peanuts[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(1): 174-184. DOI:10.1111/1750-3841.13561.
- [27] TIEMAN D, TAYLOR M, SCHAUER N, et al. Tomato aromatic amino acid decarboxylases participate in synthesis of the flavor volatiles 2-phenylethanol and 2-phenylacetaldehyde[J]. The National Academy of Sciences, 2006, 103(21): 8287-8292. DOI:10.1073/pnas.0602469103.
- [28] XU Lirong, YU Xiuzhu, LI Mengjun, et al. Monitoring oxidative stability and changes in key volatile compounds in edible oils during ambient storage through HS-SPME/GC-MS[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 20(Suppl 3): S2926-S2938. DOI:10.1080/10942912.2017.1382510.
- [29] SCHWAB W, DAVIDOVICH-RIKANATI R, LEWINSOHN E. Biosynthesis of plant-derived flavor compounds[J]. Plant Journal, 2008, 54(4): 712-732. DOI:10.1111/j.1365-3113X.2008.03446.x.
- [30] FRANKLIN L M, CHAPMAN D M, KING E S, et al. Chemical and sensory characterization of oxidative changes in roasted almonds undergoing accelerated shelf life[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2017, 65(12): 2549-2563. DOI:10.1021/acs.jafc.6b05357.
- [31] WIRTHENSOHN M G, CHIN W L, FRANKS T K, et al. Characterising the flavour phenotypes of almond (*Prunus dulcis* mill.) kernels[J]. Journal of Pomology & Horticultural Science, 2008, 83(4): 462-468. DOI:10.1080/14620316.2008.11512407.
- [32] HOJJATI M, LIPAN L, CARBONELL-BARRACHINA Á A. Effect of roasting on physicochemical properties of wild almonds (*Amygdalus scoparia*)[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2016, 93(9): 1211-1220. DOI:10.1007/s11746-016-2868-8.
- [33] LIU Z, WANG W, HUANG G, et al. *In vitro* and *in vivo* evaluation of the prebiotic effect of raw and roasted almonds (*Prunus amygdalus*)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(5): 1836-1843. DOI:10.1002/jsfa.7604.
- [34] BECK J J, WILLETT D S, GEE W S, et al. Differentiation of volatile profiles from stockpiled almonds at varying relative humidity levels using benchtop and portable GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(49): 9286-9292. DOI:10.1021/acs.jafc.6b04220.
- [35] CHU F L, YAYLAYAN V A. Model studies on the oxygen-induced formation of benzaldehyde from phenylacetaldehyde using pyrolysis GC-MS and FTIR[J]. Journal of Agriculture Food Chemistry, 2008, 56(22): 10697-10704. DOI:10.1021/jf8022468.
- [36] LASEKAN O, ABBAS K. Analysis of volatile flavor compounds and acrylamide in roasted Malaysian tropical almond (*Terminalia catappa*) nuts using supercritical fluid extraction[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(8/9): 2212-2216. DOI:10.1016/j.fct.2010.05.050.
- [37] VÁZQUEZ-ARAÚJO L, VERDÚ A, ENGUIX L, et al. Investigation of aromatic compounds in alicante and Jijona *turrón*[J]. European Food Research and Technology, 2008, 227: 1139-1147. DOI:10.1007/s00217-008-0829-7.
- [38] LEE J, KIM D H, CHANG P S, et al. Headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) analysis of oxidized volatiles from free fatty acids (FFA) and application for measuring hydrogen donating antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2007, 105: 414-420. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.12.059.
- [39] PASTORELLI S, VALZACCHI S, RODRIGUEZ A, et al. Solid-phase microextraction method for the determination of hexanal in hazelnuts

- as an indicator of the interaction of active packaging materials with food aroma compounds[J]. *Food Additives and Contaminants*, 2006, 23(11): 1236-1241. DOI:10.1080/02652030600778744.
- [40] STONE E J, HALL R M, KAZENIAC S J. Formation of aldehydes and alcohols in tomato fruit from U-¹⁴C-labeled linolenic and linoleic acids[J]. *Journal of Food Science*, 1975, 40(6): 1138-1141. DOI:10.1111/j.1365-2621.1975.tb01036.x.
- [41] LIPAN L, CANO-LAMADRID M, VÁZQUEZ-ARAÚJO L, et al. Optimization of roasting conditions in hydroSOSustainable almonds using volatile and descriptive sensory profiles and consumer acceptance[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(11): 3969-3980. DOI:10.1111/1750-3841.15481.
- [42] VÁZQUEZ-ARAÚJO L, VERDÚ A, NAVARRO P, et al. Changes in volatile compounds and sensory quality during toasting of Spanish almonds[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 44(11): 2225-2233. DOI:10.1111/j.1365-2621.2009.02063.x.
- [43] SCHLORMANN W, BIRNINGER M, BOHM V, et al. Influence of roasting conditions on health-related compounds in different nuts[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 77-85. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.02.017.
- [44] LIU X, JIN Q, LIU Y, et al. Changes in volatile compounds of peanut oil during the roasting process for production of aromatic roasted peanut oil[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(3): C404-C412. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02073.x.
- [45] XU Yuanrong, LIAO Meiji, WANG Danfeng, et al. Physicochemical quality and volatile flavor compounds of hot air-assisted radio frequency roasted almonds[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(4): e14376. DOI:10.1111/jfpp.14376.
- [46] FRANKLIN L M, MITCHELL A E. Review of the sensory and chemical characteristics of almond (*Prunus dulcis*) flavor[J]. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 2019, 67(10): 2743-2753. DOI:10.1021/acs.jafc.8b06606.
- [47] HIDALGO F J, ZAMORA R. Formation of phenylacetic acid and benzaldehyde by degradation of phenylalanine in the presence of lipid hydroperoxides: new routes in the amino acid degradation pathways initiated by lipid oxidation products[J]. *Food Chemistry*: X, 2019, 2: 100037. DOI:10.1016/j.fochx.2019.100037.
- [48] BI Hongxia, MA Changwei. Synthesis of 3-methylbutanal by Strecker reaction at unelevated temperature and in acidic systems[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2006, 17(8): 1041-1044.
- [49] HUANG Yarong, TIPPMANN J, BECKER T. A kinetic study on the formation of 2- and 3-methylbutanal[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(2): e12375. DOI:10.1111/jfpe.12375.
- [50] BECK J J, HIGBEE B S, GEE W S, et al. Ambient orchard volatiles from California almonds[J]. *Phytochemistry Letters*, 2011, 4(2): 199-202. DOI:10.1016/j.phytol.2011.03.005.
- [51] 刘英丽, 杨梓妍, 万真, 等. 发酵剂对发酵香肠挥发性风味物质形成的作用及影响机制研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 284-296. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201012-085.
- [52] CHETSCHIK I, GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Quantitation of key peanut aroma compounds in raw peanuts and pan-roasted peanut meal. Aroma reconstitution and comparison with commercial peanut products[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2010, 58(20): 11018-11026. DOI:10.1021/jf1026636.
- [53] CERNY C. 9-The role of sulfur chemistry in thermal generation of aroma[M]// PARKER J K, ELMORE J S, METHVEN L. Flavour development, analysis and perception in food and beverages. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015: 187-210. DOI:10.1016/B978-1-78242-103-0.00009-6.
- [54] FRANKEL E N. Volatile lipid oxidation products[J]. *Progress in Lipid Research*, 1983, 22(1): 1-33. DOI:10.1016/0163-7827(83)90002-4.
- [55] LIAO M, ZHAO Y, XU Y, et al. Effects of hot air-assisted radio frequency roasting on nutritional quality and aroma composition of cashew nut kernels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 116: 108551. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108551.
- [56] LEE J, XIAO L, ZHANG G, et al. The influence of storage on volatile profiles in roasted almonds (*Prunus dulcis*) [J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2014, 62(46): 11236-11245. DOI:10.1021/jf503817g.
- [57] YANG Jihong, PAN Zhongli, TAKEOKA G, et al. Shelf-life of infrared dry-roasted almonds[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(1): 671-678. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.09.142.
- [58] GHADERI F, MONAJJEMZADEH F. Review of the physicochemical methods applied in the investigation of the Maillard reaction in pharmaceutical preparations[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2020, 55: 101362. DOI:10.1016/j.jddst.2019.101362.
- [59] LIAO Meiji, ZHAO Yanyun, XU Yuanrong, et al. Effects of hot air-assisted radio frequency roasting on nutritional quality and aroma composition of cashew nut kernels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 93: 274-280. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108551.
- [60] YANG J, BINGOL G, PAN Z, et al. Infrared heating for dry-roasting and pasteurization of almonds[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 101(3): 273-280. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.07.007.
- [61] ZHOU Ye, FAN Wei, CHU Fuxiang, et al. Improvement of the flavor and oxidative stability of walnut oil by microwave pretreatment[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2016, 93(11): 1563-1572. DOI:10.1007/s11746-016-2891-9.
- [62] HOJJATI M, NOGUERA-ARTIAGA L, WOJDYŁO A, et al. Effects of microwave roasting on physicochemical properties of pistachios (*Pistaciavera* L.) [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2015, 24(6): 1995-2001. DOI:10.1007/s10068-015-0263-0.
- [63] KIRALAN M. Volatile compounds of black cumin seeds (*Nigella sativa* L.) from microwave-heating and conventional roasting[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(4): C481-C484. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02638.x.
- [64] MILCZAREK R R, AVENA-BUSTILLOS R J, PERETTO G, et al. Optimization of microwave roasting of almond (*Prunus dulcis*) [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(3): 912-923. DOI:10.1111/jfpp.12046.
- [65] GONG Yi, KERRIHARD A L, PEGG R B. Characterization of the volatile compounds in raw and roasted georgia pecans by HS-SPME-GC-MS[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(11): 2753-2760. DOI:10.1111/1750-3841.14365.
- [66] LING B, OUYANG S, WANG S. Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: storage stability and physicochemical properties[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 158-165. DOI:10.1016/j.ifset.2018.12.002.
- [67] GAO M, TANG J, WANG Y, et al. Almond quality as influenced by radio frequency heat treatments for disinfection[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 58(3): 225-231. DOI:10.1016/j.postharvbio.2010.06.005.
- [68] KORAY PALAZOGLU T, COSKUN Y, KOCADAGLI T, et al. Effect of radio frequency post-drying of partially baked cookies on acrylamide content, texture, and color of the final product[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(5): E113-E117. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02664.x.
- [69] GAO M, TANG J, VILLA-ROJAS R, et al. Pasteurization process development for controlling *Salmonella* in in-shell almonds using radio frequency energy[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(2): 299-306. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.12.021.

- [70] JIAO S, ZHU D, DENG Y, et al. Effects of hot air-assisted radio frequency heating on quality and shelf-life of roasted peanuts[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 9(2): 308-319. DOI:10.1007/s11947-015-1624-7.
- [71] LABUZA T P, DUGAN L R. Kinetics of lipid oxidation in foods[J]. Critical Reviews in Food Technology, 1971, 2(3): 355-405. DOI:10.1080/10408397109527127.
- [72] MATÉ J I, SALTVEIT M E, KROCHTA J M. Peanut and walnut rancidity: effects of oxygen concentration and relative humidity[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(2): 465-469. DOI:10.1111/j.1365-2621.1996.tb14218.x.
- [73] ROGEL-CASTILLO C, LUO K, HUANG G, et al. Effect of drying moisture exposed almonds on the development of the quality defect concealed damage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(40): 8948-8956. DOI:10.1021/acs.jafc.7b03680.
- [74] ROGEL-CASTILLO C, ZUSKOV D, CHAN B L, et al. Effect of temperature and moisture on the development of concealed damage in raw almonds (*Prunus dulcis*)[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2015, 63(37): 8234-8240. DOI:10.1021/acs.jafc.5b03121.
- [75] WARNER K J H, DIMICK P S, ZIEGLER G R, et al. 'Flavor-fade' and off-flavors in ground roasted peanuts as related to selected pyrazines and aldehydes[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(2): 469-472. DOI:10.1111/j.1365-2621.1996.tb14219.x.
- [76] BECK J J, MAHONEY N E, COOK D, et al. Volatile analysis of ground almonds contaminated with naturally occurring fungi[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(11): 6180-6187. DOI:10.1021/jf200739a.
- [77] PRIPIS-NICOLAU L, DE REVEL G, BERTRANDA, et al. Formation of flavor components by the reaction of amino acid and carbonyl compounds in mild conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(9): 3761-3766. DOI:10.1021/jf991024w.
- [78] RAISI M, GHORBANI M, SADEGHI MAHOONAK A, et al. Effect of storage atmosphere and temperature on the oxidative stability of almond kernels during long term storage[J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 62: 16-21. DOI:10.1016/j.jspr.2015.03.004.
- [79] 杨双喜, 马尧, 张海红, 等. 干燥方式对黄花菜粉营养、色泽及氨基酸含量的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 232-241. DOI:10.16429/j.1009-7848.2022.10.025.
- [80] 张小燕, 张宗营, 彭勇, 等. 热风干燥和真空冷冻干燥对‘美红’苹果片干燥特性及品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2022: 1-10. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033250.
- [81] 苏振, 亢诗雨, 钱晨玮, 等. 新型食品包装材料研究进展[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(4): 126-131. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.04.020.
- [82] 王佳媚. 纳米TiO₂/Fe₂O₃等光催化协同高压电场等离子体靶向抑菌机理及鸡肉保鲜包装研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 4-5.
- [83] 王怡, 袁宁, 王佳宇, 等. 鲜切黄瓜保鲜技术研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 96-104. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.15.011.
- [84] 王贺, 曹转虎, 鲁玉杰, 等. 真空包装粳米启封后品质变化的研究[J]. 食品科技, 2022, 47(9): 131-137. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2022.09.024.
- [85] 赵赓九, 胡晖, 刘红芝, 等. 鲜食花生品质评价和贮藏加工研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 314-320. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220316-193.
- [86] 张子俊, 杨桂花, 蒋启蒙, 等. 纳米纤维素基复合膜的制备及其在食品保鲜领域的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 312-331. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220805-065.
- [87] PIRSA S, CHAVOSHIZADEH S. Design of an optical sensor for ethylene based on nanofiber bacterial cellulose film and its application for determination of banana storage time[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29: 1385-1393. DOI:10.1002/PAT.4250.