

烘烤温度对澳洲坚果营养成分和风味的影响

蔡星辰¹ 于 敏¹ 孙嘉笛¹ 陈静静²

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】探究澳洲坚果的适宜烘烤温度。【方法】用不同烘烤温度(140、160、180 °C)烘烤澳洲坚果 5 min, 分别测定其挥发性物质、总酚、总黄酮、抗氧化能力的变化。【结果】澳洲坚果主要含有 6 种脂肪酸: 花生酸、花生四烯酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、棕榈油酸。不饱和脂肪酸相对含量高于 83%, 主要为亚油酸和棕榈油酸。烘烤温度对澳洲坚果脂肪酸相对含量及组成无明显影响。烘烤处理后, 澳洲坚果中总酚质量分数、总黄酮质量浓度、抗氧化活性均有提高, 说明烘烤提高了澳洲坚果的生物活性和抗氧化性能。较高的烘烤温度会使澳洲坚果中总酚的质量分数和总黄酮的质量浓度增加, 提高其抗氧化能力。高温烘烤后, 澳洲坚果会产生美拉德反应产物和脂质过氧化产物。对比发现, 160 °C 下烘烤 5 min 后, 坚果香气物质相对含量较高, 具有良好的烘焙香。此外, 澳洲坚果中蛋白质的相对分子质量约为 50 000 和 40 000。160 °C 烘烤得到的澳洲坚果蛋白质的稳定性较好。【结论】160 °C 烘烤 5 min 可更好提高澳洲坚果的感官和营养品质。

关键词: 坚果; 烘烤; 挥发性物质; 抗氧化活性

Effect of Roasting Temperature on Nutritional Composition and Flavor of Macadamia Nuts

CAI Xingchen¹ YU Min¹ SUN Jiadi¹ CHEN Jingjing²

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to explore the suitable roasting temperature for macadamia nuts. [Method] Macadamia nuts were roasted at 140, 160, and 180 °C for 5 min, respectively. The changes in volatile substances, total phenols, total flavonoids, and antioxidant capacity were determined. [Result] Macadamia nuts mainly contained six kinds of fatty acids: arachic acid, arachidonic acid, oleic acid, linoleic acid, palmitic acid, and palmitoleic acid. Unsaturated fatty acids, mainly linoleic acid and palmitoleic acid, accounted for more than 83%. Roasting temperature had no significant effect on the relative content and composition of fatty acids in macadamia nuts. After roasting treatment, the mass fraction of total phenols and the mass concentration of total flavonoids, as well as the antioxidant activity of macadamia nuts were increased, indicating that roasting improved the biological activity and antioxidant activity of macadamia nuts. Higher roasting temperature increased the mass fraction of total phenols and the mass concentration of total flavonoids in macadamia nuts, and improved their antioxidant capacity. Macadamia nuts roasted at high temperatures produced Maillard reaction products and lipid peroxidation products. It was found that roasting at 160 °C for 5 min resulted in a higher relative content of aroma substances in macadamia nuts, imparting a desirable roasted aroma. In addition, the relative molecular weights of macadamia protein were about 50 000 and 40 000. The stability of macadamia nut protein

基金项目: 崇左市科技计划项目(FA20210710)。

通信作者: 陈静静(1986—), 女, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要从事农副产品开发、利用和改性研究。E-mail: jingjinc@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2022-09-30 修回日期: 2022-10-24

was better after roasting at 160 °C. **[Conclusion]** Roasting at 160 °C for 5 min can better improve the sensory and nutritional qualities of macadamia nuts.

Keywords: nut; roasting; volatile substance; antioxidant activity

澳洲坚果,即昆士兰栗、澳洲胡桃、夏威夷果,为山龙眼科澳洲坚果属多年生常绿果树,是双子叶植物,富含蛋白质、维生素、必需氨基酸、植物甾醇、不饱和脂肪酸和多糖等多种营养物质。澳洲坚果中单不饱和脂肪酸的质量占果仁总质量的59%。不饱和脂肪酸有多种功效,包括降血脂、控制体质量和缓解慢性炎症,具有良好的开发前景^[1]。澳洲坚果的蛋白质含量高,是开发植物蛋白饮料的优质原料。

烘烤是坚果类食品产生香气成分的关键,不同的烘烤时间和温度均会影响其香气物质的组成和含量。坚果的烘烤温度一般高于100 °C^[2],这是由于温度越低,醛和醇的含量越高,高温会形成吡嗪类化合物,而吡嗪类化合物是坚果油的关键香气成分^[2-4]。随着烘烤温度从130 °C升至170 °C,果仁香气成分的种类和质量分数显著增加,特别是吡嗪类和呋喃类物质,且2,5-二甲基吡嗪是所有烘烤澳洲坚果果仁香气成分中质量分数最高的物质^[5]。与生坚果相比,烘烤坚果的感官品质、营养品质和氧化稳定性都有很大提高,烘烤过程显著提高了澳洲坚果的果仁品质^[6]。

澳洲坚果富含多不饱和脂肪酸,储藏过程中易被脂肪氧合酶氧化并产生酸败气味。为提升澳洲坚果的风味和营养价值,拟采用烘烤作为澳洲坚果的预处理方式:一方面抑制脂肪氧合酶的活性,防止澳洲坚果在后续加工过程中发生酸败;另一方面可提升澳洲坚果的风味和营养价值。作者考察了烘烤条件对澳洲坚果中脂肪酸组成、挥发性物质、抗氧化性和坚果蛋白质性质的影响,旨在为后续澳洲坚果蛋白饮料的开发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

风干澳洲坚果仁:广西南亚热带农业科学研究所;甲醇、DPPH、氯化铝、没食子酸、芦丁;色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;考马斯亮蓝 G-250、亚硝酸钠、氯化铝、氢氧化钠、L-抗坏血酸、乙醇、碳酸钠、甲醇、SDS、石油醚、正己烷、葡萄糖、苯酚、福林酚试剂、醋酸、硫酸:分析纯,上海化学

试剂有限公司;蛋白质标记物(相对分子质量为10~250,货号:WJ103)、PAGE所用凝胶、样品缓冲液:上海雅酶生物医药科技有限公司;0.22 μm 滤膜:浙江欧尔赛斯科技有限公司。

1.2 仪器与设备

LABCONCO 冷冻干燥机:4.5 L 型,北京照生行仪器设备有限公司;电子天平:PL2002 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;分析天平:X205BDU 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;pH 计:PE28-S 型:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;数显高速分散均质机:FJ300-SH 型,上海越磁电子科技有限公司;紫外可见分光光度计:U61T 型,日本 MAPADA 株式会社;数显磁力恒温搅拌:C-MAG HS7 型,美国 IKA 公司;高速低温离心机:CR30NX 型,日本 Himac 公司;循环水式多用真空泵:SHK-III 型,郑州科泰实验设备有限公司;电泳仪:1645050 型,美国伯乐公司;激光粒度分析仪:Mastersizer 2000 型,英国 Malvern 公司;粒度分析仪:Nano Brook Omni,美国布鲁克海文仪器公司;搅拌机:YF-1000 型,中国浙江杭州永利制药机械有限公司;烤箱:NB-HM3810 型,日本松下公司;气相色谱仪:GC2030 AF 型,日本岛津公司;气相色谱-飞行时间质谱仪:Pegasus BT,美国力可公司;凝胶成像分析系统:ChemiDocXRS+型,美国伯乐公司。

1.3 不同烘烤温度下澳洲坚果脂肪酸的组成、风味和营养成分

1.3.1 澳洲坚果的烘烤

取 100 g 澳洲坚果,均匀地铺在预热好的托盘中,以不同烘烤温度和时间组合试验。根据烘烤后坚果是否有焦糊味及表面色泽,最终确定:取样 200 g,分别在 140、160、180 °C 下烘烤 5 min,分别磨粉后过 60 目筛,并在-4 °C 冰箱中储存。

1.3.2 脂肪酸组成

按 Zhang 等^[7]的方法,用配备自动注射器的气相色谱仪测定澳洲坚果中脂肪酸的组成。取 25 g 坚果粉,置于索氏提取器中,用正己烷回流提取 6 h,旋转蒸发回收溶剂。取 0.1 mL 油样,用 2 mL

正己烷溶解,加入 2 mL 0.4 mol/L 氢氧化钾-甲醇溶液后混匀,常温下静置 5 min。加水至刻度,静置分层。吸取上层,过滤膜后进行气相色谱检测。用编程温度法将色谱柱的温度从 80 °C 升高到 250 °C。火焰离子化检测器的温度也为 250 °C。与 NSIT 库匹配,并采用峰面积归一化法计算脂肪酸的相对含量。

1.3.3 挥发性物质组成

使用气相色谱-飞行时间质谱仪测定挥发性物质的组成。参照刘晓君等^[8]的方法并稍加修改,GC-MS 色谱条件:初始柱温为 50 °C,保持 2 min,然后以 3 °C/min 升温至 150 °C,保持 1 min,并以 5 °C/min 升温至 250 °C,进样口温度为 250 °C。使用电子电离源,电子能量为 70 eV,离子源温度为 250 °C,质荷比扫描范围为 33~450。根据面积归一化法,挥发性物质的相对含量以百分比表示。挥发性物质与 NSIT 库和 Wiley Library 库匹配,并采用峰面积归一化法计算挥发性物质的相对含量。

1.3.4 酚类物质及抗氧化活性测定

1) 样液制备:用 Bhinderl 等^[9]的方法提取澳洲坚果中的酚类物质。取澳洲坚果粉末 1.5 g,加入 25 mL 体积分数 80% 的甲醇溶液,超声处理 1 h 后,以 6 000 r/min 离心 8 min。将沉淀于 80% 甲醇中重复提取一次,合并 2 次得到的上清液,调节 pH 为 4.0~4.5,得到含游离酚类及游离黄酮的提取液。旋转蒸发去除甲醇,用 75 mL 的 0.4 mol/L 氢氧化钠溶液处理游离酚类及游离黄酮提取后留下的沉淀 2 h。调节 pH 为 4.0~4.5,离心得到含结合酚类及结合黄酮的提取液。

2) 总酚测定:采用福林酚比色法,以没食子酸为标准品,绘制标准曲线。取 0.25 mL 待测提取液,用蒸馏水稀释至 3.8 mL。加入 300 μL 福林酚试剂,反应 8 min,加入 900 μL 质量分数 20% 的碳酸钠溶液。在室温下避光放置 1 h 后,于 750 nm 波长下测定溶液的吸光度,以水为空白对照,测定不同浓度(1、2、3、4、5、6 mol/L)没食子酸溶液的吸光度,绘制校准曲线,并计算未知样品中酚类物质的质量分数。游离酚、结合酚和总酚均以每克澳洲坚果粉中含有没食子酸的质量计(mg/g)。

3) 总黄酮测定:参照丁峰等^[10]的方法,采用亚硝酸钠-氯化铝络合分光光度法定澳洲坚果中黄酮

类化合物的质量分数。取 4.0 mL 待测液至 10 mL 比色管中,加入体积分数 60% 的甲醇溶液至 5.0 mL,加入质量分数 5% 的亚硝酸钠溶液 0.3 mL,摇匀,静置 8 min;再加入 0.3 mL 氯化铝溶液,摇匀,静置 10 min;加入 4.0 mL 质量分数 4% 的氢氧化钠溶液,用体积分数 60% 甲醇溶液定容至刻度,摇匀,静置 10 min。以体积分数 60% 的甲醇溶液为空白,在 510 nm 下测定吸光度。在上述波长下测量标准芦丁溶液(16、20、26、30、36、40 mol/L)的吸光度,绘制校准曲线,并计算澳洲坚果中游离黄酮、结合黄酮和总黄酮的质量分数。结果以每克澳洲坚果粉中含有芦丁的质量计(mg/g)。

4) 抗氧化活性:参照孙亚娟^[11]的方法,取稀释待测液 2.0 mL 于具塞试管内,加入 2.0 mL 的 0.1 mmol/L DPPH-甲醇溶液,混匀,避光反应 30 min,在 517 nm 下测定吸光度,以甲醇为空白对照,DPPH 自由基清除能力的计算方法见式(1)。在上述波长下,测定 L-抗坏血酸标准溶液的吸光度并绘制校准曲线。提取物的抗氧化活性用 DPPH 自由基清除率表示,见式(1)。

$$R = (1 - A_0/A_1) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

R ——DPPH 自由基清除率,%;

A_0 ——样品组吸光度,由 2.0 mL 待测液和 2.0 mL DPPH-甲醇溶液组成;

A_1 ——对照组吸光度,由 2.0 mL 甲醇和 2.0 mL DPPH-甲醇溶液组成。

1.4 澳洲坚果蛋白质的提取与分析

1.4.1 提取方法

用碱溶酸沉法提取澳洲坚果蛋白质:用正己烷给澳洲坚果粉脱脂 3 次(坚果粉和正己烷的质量体积比为 1 g:4 mL),旋转蒸发去除正己烷。用去离子水按质量体积比 1 g:10 mL 提取脱脂坚果粉,并用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 至 9.0,室温下搅拌 2 h 后离心 30 min,收集上清液,重复提取 2 次后合并上清液,用 1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 至 4.5 后离心,水洗所得沉淀,用冷冻干燥机冷冻干燥,保存在 -20 °C 冰箱中备用。

1.4.2 相对分子质量的测定

用 12.5 g/dL 的分离胶、4 g/dL 的浓缩胶的凝胶电泳分析澳洲坚果蛋白质的相对分子量^[12]。将澳洲坚果蛋白质溶解在 pH 7.0 的 5 mg/mL 磷酸盐缓冲液中,取 10 μL 样品与缓冲液按体积比 4:1

混合,沸水浴 10 min 后离心,点样后以 120 V 电压进行电泳。电泳结束后,染色 2 h,多次脱色至背景无蓝色后观察其凝胶成像。以蛋白质标记物为对照。脱色后利用凝胶成像分析系统与蛋白质标记物进行对比。

1.4.3 粒径分析

用粒径分析仪测定澳洲坚果蛋白质在纯水中的粒径,以分析不同烘烤温度下澳洲坚果蛋白质的稳定性。用激光粒度分析仪测定澳洲坚果蛋白质乳液的粒度。参数设置如下:分析模式为通用,颗粒折射率为 1.59,颗粒吸收率为 0.001,分散剂折射率为 1.330。用平均粒径表征液滴粒度。

1.4.4 数据处理与统计分析

所有试验均重复 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准偏差的形式表示,使用 SPSS 软件(IBM SPSS 20)对数据进行统计分析,方差分析中 $P < 0.05$ 表示差异显著,用 Duncan 法作多重比较,采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 烘烤温度对澳洲坚果中脂肪酸的影响

由表 1 可知,澳洲坚果中主要含有 6 种脂肪酸,即花生酸、花生四烯酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、棕榈油酸。澳洲坚果含油量高,油脂中饱和脂肪酸的相对含量为 12%~13%,主要为棕榈酸和花生酸,其中棕榈酸的相对含量较高,与文献结果一致^[13];不饱和脂肪酸的相对含量为 83%~85%,主要为亚油酸和棕榈油酸。不饱和脂肪酸有多种健康益处,包括降低有害胆固醇水平、调节血糖、促进大脑和神经系统发育、预防心血管疾病以及调节血脂等^[14]。澳洲坚果中富含的棕榈油酸具有控制体质量、改善皮肤状况、预防动脉粥样硬化、改善代谢综合征与炎症、防止骨碎、改善干眼症等功效^[14]。表 1 表明,烘烤温度对澳洲坚果脂肪酸相对含量的影响不明显。研究表明,不同品种的种

子间脂肪酸含量存在差异,短时间(12 min)微波照射不会给亚油酸含量造成显著损失^[15]。然而,Rodrigues 等^[16]发现,在 200 °C 烘烤 50 min,花生中的脂肪酸含量会下降。因此,延长烘烤时间或进一步提高烘烤温度对澳洲坚果脂肪酸相对含量的影响有待进一步研究。

2.2 烘烤温度对澳洲坚果挥发性物质的影响

在澳洲坚果中可以识别出多种挥发性物质,包括醛、酮、醇、酸、酯、胺、酚、杂环化合物和有机硫化物。表 2 列出了生坚果以及烘烤温度为 140、160、180 °C 下的澳洲坚果中相对含量较高的 56 种挥发性物质,其中酸类 8 种、酮类 10 种、醛类 9 种、杂环化合物 14 种、醇类 6 种、酯类 3 种、胺类 2 种、酚类及有机硫化物各 1 种。

由表 2 可知,与未烘烤的生坚果不同,在烘烤后的澳洲坚果中主要鉴定出了 9 种吡嗪,分别是 2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2,6-二甲基-2-乙基吡嗪、2-甲酰胺吡嗪、2-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪。其中 2,5-二甲基吡嗪在吡嗪类物质中的相对含量较高,具有典型的焙烤味、可可味、坚果味和咖啡味^[17]。随着烘烤温度升高,澳洲坚果中 2,3,5-三甲基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪的相对含量明显增加。吡嗪类物质是典型的美拉德反应产物,是烘烤澳洲坚果具有特征香气的重要原因^[18]。吡咯源自美拉德反应,有典型的烤面包味、甜味、可可味,能增强澳洲坚果的风味。烘烤澳洲坚果中检测到 4 种呋喃衍生物,分别是 2-甲基-2-[2-二甲基(苯基)硅丙基-2-烯基]四氢呋喃、5-甲基糠醛、糠醛和 2-(5H)-呋喃酮,这些物质在生坚果中均未检出,其中 5-甲基糠醛和 2-(5H)-呋喃酮的相对含量随烘烤温度升高而增加。因此,呋喃类衍生物也是烘烤坚果中的典型香气物质,具有焦糖味和奶

表 1 不同烘烤温度下澳洲坚果的脂肪酸组成

Table 1 Fatty acid composition of macadamia nuts roasted at different temperatures

烘烤温度/°C	脂肪酸相对含量/%							
	棕榈酸	花生酸	棕榈油酸	油酸	亚油酸	花生四烯酸	饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸
0	8.361	3.867	11.895	5.788	64.445	2.062	12.228	84.190
140	8.805	3.846	11.906	5.997	63.951	1.891	12.651	83.745
160	9.280	2.770	13.961	5.738	63.935	1.458	12.050	85.092
180	9.394	2.808	13.806	5.701	63.943	1.498	12.202	84.948

注:0 表示未烘烤的生坚果。

油味。脂质过氧化物或碳水化合物降解是呋喃衍生物形成的2个可能原因^[19]。

顶空气相检测表明澳洲坚果中存在9种主要的醛类物质,其中己醛、庚醛、辛醛、壬醛属于脂肪酸醛类,都具有果香味、脂肪味和青草味。己醛源自亚油酸氧化;苯甲醛是氨基酸苯丙氨酸的降解产物,有特殊的焦糖味和苦杏仁味^[2]。所有样品中,160℃下烘烤的澳洲坚果,其醛类和醇类物质

的种类最丰富,且总相对含量最高。随着烘烤温度进一步升高,所有醇类物质的相对含量均下降。

这些挥发性物质的种类和相对含量变化主要由烘烤中发生的美拉德反应引起,美拉德反应使烘烤后的坚果呈土褐色并有浓郁的焦糖香气。比较生坚果与各温度下烘烤后的坚果中挥发性物质的相对含量,发现160℃烘烤5 min的坚果中典型香气物质的相对含量较高,有较丰富的烘烤香气。

表2 未烘烤及不同烘烤温度下澳洲坚果中的挥发性物质
Table 2 Volatile substances in macadamia nuts unroasted and roasted at different temperatures

类别	挥发性物质	相对含量/%			
		生坚果	140℃	160℃	180℃
酸类	醋酸	—	—	8.496	8.332
	己酸	0.510	0.362	0.553	0.436
	辛酸	0.252	0.194	0.475	0.352
	庚酸	0.213	0.158	0.345	0.264
	丙酸	0.186	0.103	0.139	0.134
	戊酸	0.122	0.064	0.131	—
	壬酸	0.087	0.071	0.124	0.103
	苯甲酸	0.181	0.124	0.123	0.106
酮类	2-吡咯烷酮	—	—	1.317	—
	1-羟基异丙酮	—	—	0.693	1.957
	1-(1H-吡咯-2-基)-乙酮	—	—	0.225	—
	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-四氢吡喃-4-酮	—	—	0.202	1.660
	2-(5H)-呋喃酮	—	0.096	0.197	0.483
	1-(乙酰氧基)-2-丙酮	—	—	0.165	0.567
	1-甲氧基-2-丙酮	—	—	0.133	—
	4-甲基-5H-呋喃-2-酮	—	0.072	0.119	0.112
	3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮	—	0.013	0.101	—
	2,2,3-三甲基-环丁酮	—	—	0.097	0.084
醛类	糠醛	—	0.942	1.511	—
	苯甲醛	—	0.596	1.598	0.985
	壬醛	—	—	0.967	—
	5-甲基糠醛	—	0.335	0.461	1.059
	辛醛	—	—	0.448	0.350
	庚醛	0.220	0.335	0.425	0.321
	N,N-二苄基-2-氨基乙醛	—	—	0.273	—
	己醛	0.213	—	0.251	0.265
	3-羟基丙醛	—	—	0.144	0.268
	2,5-二甲基吡嗪	—	0.712	4.750	6.140
杂环化合物	2,3,5-三甲基吡嗪	—	0.139	1.220	4.691
	反式-3,5,6,8a-四氢-2,5,5,8a-四甲基-(2H)-1-苯并吡喃	—	0.894	1.133	0.670
	1-甲基-2-氰基-2-哌啶	0.020	0.161	0.793	—

续表

类别	挥发性物质	相对含量/%			
		生坚果	140 °C	160 °C	180 °C
杂环化合物	2-乙基-6-甲基吡嗪	—	—	0.382	1.619
	2-甲基-2-[2-二甲基(苯基)硅丙基-2-烯基]四氢呋喃	—	0.043	0.329	—
	2,3-二甲基吡嗪	—	—	0.209	0.884
	2,4,6-三甲基-吡啶	0.205	—	0.146	0.208
	2,6-二甲基-2-乙烯基吡嗪	—	—	0.124	0.688
	2-甲酰胺吡嗪	—	0.022	0.115	0.503
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	0.023	0.102	0.106	—
	1H-吡咯	—	0.059	0.104	0.143
	2-甲基吡嗪	—	—	6.015	—
	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	—	—	5.150	—
醇类	苯乙醇	1.059	0.749	1.257	0.068
	乙醇	0.911	0.729	0.718	—
	1-庚醇	0.510	—	0.572	0.358
	1-甲氧基-2-丙醇	0.581	0.265	0.462	0.272
	正己醇	0.554	0.462	0.369	—
	1-辛醇	0.327	—	0.342	—
酯类	1,4-丁内酯	0.104	0.155	0.348	0.890
	2-羟基-2-(1-甲基-4-苯硫基-1H-吡啶-3-甲基)丙二酸二乙酯	—	—	0.174	—
	(+)-(S)-2-羟基-3-二甲基- γ 丁内酯	0.036	—	0.127	—
胺类	(S)-1-(2-吡啶基)-2-甲基丙胺	—	0.056	0.248	0.902
	乙酰胺	—	0.063	0.123	0.285
酚类	苯酚	—	18.980	26.210	6.030
有机硫化物	二甲基砷	—	—	0.234	—
其他	甘草酸	0.260	0.246	0.302	0.153
	2-氨基-4-甲基-2-戊腈	—	—	0.107	0.010

注：“—”表示未检出。

2.3 烘烤温度对澳洲坚果中酚类及其抗氧化活性的影响

由图 1 可知,澳洲坚果中结合酚的质量分数高于游离酚,总酚的质量分数为 8.24~10.04 mg/g(以没食子酸质量计),高于 Peiretti 等^[19]报道的 0.09~0.20 mg/g(以没食子酸质量计)。研究表明,坚果样品中总酚的质量浓度为 579~698 $\mu\text{g/mL}$,而瓜类(*Cucurbita pepo*)提取物中总酚的质量分数为 9.82 mg/g(以没食子酸质量计)^[20],造成这种差异的可能原因是原料和提取方法不同。

由图 1~2 可知,澳洲坚果中总酚质量分数和总黄酮质量浓度随烘烤温度的升高而增加。因此,180 °C 时澳洲坚果中总酚质量分数和总黄酮质量浓度最高,分别是生澳洲坚果的 1.22 倍和 1.36 倍。Saavedra 等^[17]也发现煮熟的南瓜种子的总酚质量分数高于新鲜的种子。研究表明,烘烤

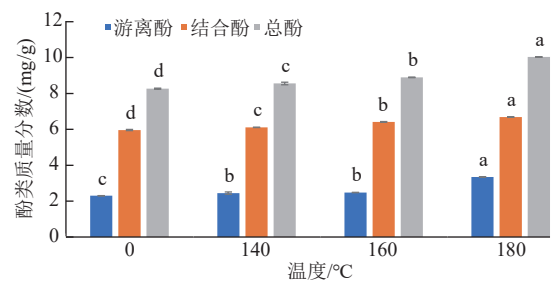
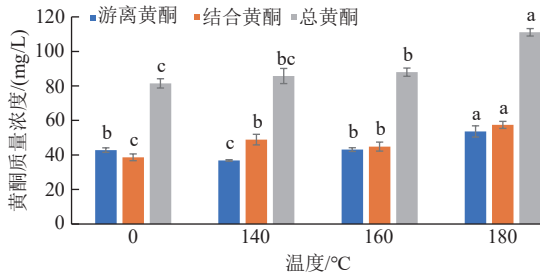
不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 0 表示未烘烤的生坚果。

图 1 不同烘烤温度下澳洲坚果中游离酚、结合酚及总酚的质量分数

Fig. 1 Mass fractions of free phenols, bound phenols and total phenols in macadamia nuts at different roasting temperatures

可以提高不同坚果中总酚和总黄酮的质量分数^[9,21-22],有 2 个可能的原因:一是烘烤破坏了细胞结构,使结合酚类和黄酮类化合物释放出来,另一

个是美拉德反应产生了多种化合物,可与福林酚试剂反应,使测得的总酚质量分数偏高。

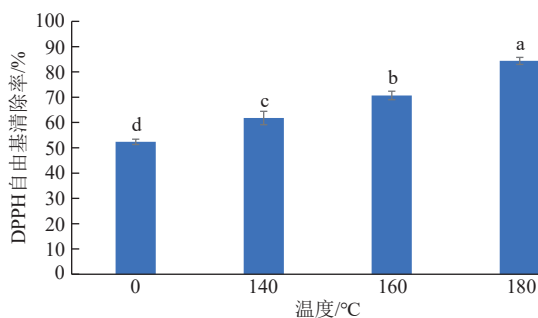


不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$);0表示未烘烤的生坚果。

图2 不同烘烤温度下澳洲坚果中游离黄酮、结合黄酮及总黄酮的质量浓度

Fig. 2 Mass concentrations of free flavonoids, bound flavonoids, and total flavonoids in macadamia nuts at different roasting temperatures

由图3可知,烘烤澳洲坚果的DPPH自由基清除率显著高于生澳洲坚果,随着烘烤温度升高,澳洲坚果的抗氧化活性显著增加,可能原因是总酚质量分数提高。此外,美拉德反应提高了抗氧化性。Jogihalli等^[23]认为烤鹰嘴豆的抗氧化活性增加是因为美拉德反应,黑色素和Amadori重排产物有螯合金属和清除氧自由基的能力^[22,24]。Nooshkam等^[24]发现,肽-乳果糖系统的美拉德反应产物比乳清蛋白-乳果糖系统更多,且其DPPH自由基清除活性也更高。



不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$);0表示未烘烤的生坚果。

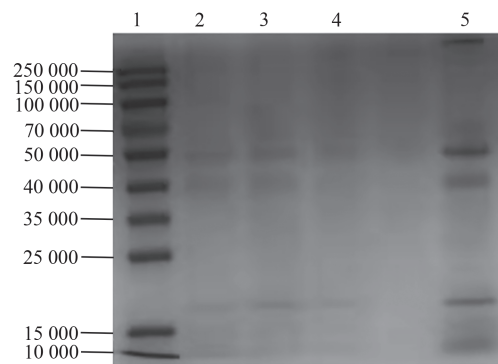
图3 不同烘烤温度下澳洲坚果的抗氧化活性

Fig. 3 Antioxidant activity of macadamia nuts at different roasting temperatures

2.4 烘烤温度对澳洲坚果中蛋白质相对分子质量的影响

用SDS-PAGE测定澳洲坚果中蛋白质的相对分子质量,结果见图4。澳洲坚果中蛋白质的相对

分子质量约为50 000和40 000,这与彭倩等^[25]的结果一致。染色后澳洲坚果中蛋白质的条带分布显示,大部分的蛋白质是低相对分子质量的蛋白质,这与其他坚果蛋白质,如白果蛋白质^[26]、腰果蛋白质^[27]、棉籽分离蛋白^[28]有相似性。澳洲坚果蛋白质的特征组分为球蛋白,球蛋白亚基由2个多肽通过二硫键组成^[25]。其他质量分数较低的组分还有清蛋白和谷蛋白。与生澳洲坚果中蛋白质的条带相比,经过烘烤的澳洲坚果,其蛋白质的条带强度降低,且在180 °C下烘烤5 min的澳洲坚果的蛋白质条带强度低于在140 °C下烘烤5 min的澳洲坚果的蛋白质条带。说明高温导致蛋白质变性,且温度越高蛋白质变性越严重。加热到180 °C对澳洲坚果中蛋白质的相对分子质量分布没有明显影响。



1—Maker;2—140 °C下烘烤5 min的澳洲坚果的蛋白质;3—160 °C下烘烤5 min的澳洲坚果的蛋白质;4—180 °C下烘烤5 min的澳洲坚果的蛋白质;5—未烘烤的生坚果的蛋白质。

图4 澳洲坚果蛋白质的SDS-PAGE结果

Fig. 4 SDS-PAGE results of macadamia nut protein

2.5 烘烤温度对澳洲坚果蛋白质粒径的影响

由表3可知,不同烘烤温度下,澳洲坚果蛋白质的粒径差异较大。在140 °C和180 °C下烘烤的澳洲坚果,其蛋白质粒径高于生澳洲坚果的蛋白质粒径,而160 °C下烘烤的样品,其蛋白质粒径与生坚果的蛋白质粒径相近,因而表现出更高的稳定性。由此可知,适宜的烘烤温度有利于获得热稳定的澳洲坚果蛋白质。有研究表明,充分的高温处理可以获得稳定的植物分离蛋白^[29]。热处理能够与乳化技术相结合,制备大小可调、聚集速率可调的蛋白质颗粒^[30]。结果表明,澳洲坚果中的蛋白质可在高温加工的食品中作为一种潜在的稳定剂。

表 3 不同烘烤温度下澳洲坚果的平均粒径

Table 3 Average particle size of macadamia nuts at different roasting temperatures

烘烤温度/℃	平均粒径/nm
0	268.95±46.81 ^c
140	300.76±24.16 ^b
160	243.94±37.88 ^d
180	403.70±32.28 ^a

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);0表示未烘烤的生坚果。

3 结论

通过不同烘烤温度研究烘烤条件对澳洲坚果中酚类物质质量分数、黄酮类物质质量浓度、抗氧化性、脂肪酸和挥发性物质组成以及蛋白质性质的影响。澳洲坚果中主要含有 6 种脂肪酸,即花生酸、花生四烯酸、油酸、亚油酸、棕榈酸和棕榈油酸,不饱和脂肪酸的相对含量大于 83%,主要为亚油酸和棕榈油酸。烘烤后澳洲坚果中吡嗪类物质及呋喃类物质的种类和相对含量增加,使烘烤坚果具有典型的烘焙香味。在 160 ℃下烘烤 5 min 后,坚果中香气物质的相对含量较高,具有良好的烘焙香气。烘烤处理后,澳洲坚果中总酚质量分数、总黄酮质量浓度和抗氧化性均有提高,说明烘烤提高了澳洲坚果的生物活性和抗氧化性。SDS-PAGE 结果表明澳洲坚果中蛋白质的相对分子质量约为 50 000 和 40 000。结合 SDS-PAGE 结果和粒径分析结果可知,160 ℃下烘烤 5 min 得到的澳洲坚果蛋白质的稳定性较好。本研究表明,一定的烘烤温度可提高澳洲坚果的感官和营养品质,为澳洲坚果蛋白饮料的开发提供理论依据和参考。

参考文献

- [1] 帅希祥. 澳洲坚果油组成、营养及其油凝胶体系构建和应用[D]. 南昌:南昌大学,2023.
- [2] SIEGMUND B, MURKOVIC M. Changes in chemical composition of pumpkin seeds during the roasting process for production of pumpkin seed oil (Part 2: volatile compounds)[J]. Food Chemistry, 2004, 84(3):367-374.
- [3] POEHLMANN S, SCHIEBERLE P. Characterization of the aroma signature of styrian pumpkin seed oil (*Cucurbita pepo* subsp. *pepo* var. *Styriaca*) by molecular sensory science[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(12):2933-2942.
- [4] POTOČNIK T, KOŠIR I J. Influence of roasting temperature of pumpkin seed on PAH and aroma formation[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(3):1500593.
- [5] JING W, LIU Y J, PENG S D, et al. Effects of roasting on volatile components profile in macadamia nut kernels (*Macadamia integrifolia*)[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(7):110-119.
- [6] TU X H, WU B F, XIE Y, et al. A comprehensive study of raw and roasted macadamia nuts: lipid profile, physicochemical, nutritional, and sensory properties[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(3):1688-1697.
- [7] ZHANG S, ZU Y G, FU Y J, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of seed oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) and its anti-oxidant activity[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(7):2537-2544.
- [8] 刘晓君, 金青哲, 王珊珊, 等. HS-SPME-GC/MS 分析花生油挥发性成分技术的优化[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(4):500-507.
- LIU X J, JIN Q Z, WANG S S, et al. Optimazation of solid-phase microextraction conditions combined with GC-MS for analysis of volatiles in peanut oil[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2010, 29(4):500-507. (in Chinese)
- [9] BHINDER S, SINGH B, KAUR A, et al. Effect of infrared roasting on antioxidant activity, phenolic composition and Maillard reaction products of tartary buckwheat varieties[J]. Food Chemistry, 2019, 285:240-251.
- [10] 丁峰, 陆玮, 刘智慧, 等. 槐米及其制品中总黄酮含量测定方法的研究[J]. 酿酒, 2018, 45(5):97-100.
- DING F, LU W, LIU Z H, et al. Study on determination method of total flavones in *Sophora japonica* and its products[J]. Liquor Making, 2018, 45(5):97-100. (in Chinese)
- [11] 孙亚娟. 不同烘焙温度对带种皮压榨杏仁油品质特性的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.
- [12] 任二芳, 刘功德, 艾静汶, 等. 不同干燥方式对澳洲坚果品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12):136-141.
- REN E F, LIU G D, AI J W, et al. Effects of different drying methods on macadamia nut quality[J]. Food Research and Development, 2021, 42(12):136-141. (in Chinese)
- [13] 王文林, 赵静, 秦斌华, 等. 澳洲坚果脂肪酸成分分析[J]. 热带农业工程, 2013, 37(1):1-3.
- WANG W L, ZHAO J, QIN B H, et al. Analysis of fatty acid composition of macadamia nut[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2013, 37(1):1-3. (in Chinese)

- [14] 夏琛, 崔心禹, 项婷, 等. 棕榈油酸功能的研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 39-43.
XIA C, CUI X Y, XIANG T, et al. Progress in the function of palmitoleic acid[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(2): 39-43. (in Chinese)
- [15] YOSHIDA H, TOMIYAMA Y, HIRAKAWA Y, et al. Microwave roasting effects on the oxidative stability of oils and molecular species of triacylglycerols in the kernels of pumpkin (*Cucurbita* spp.) seeds[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19 (4): 330-339.
- [16] RODRIGUES A C, STRÖHER G L, FREITAS A R, et al. The effect of genotype and roasting on the fatty acid composition of peanuts[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 187-192.
- [17] SAAVEDRA M J, AIRES A, DIAS C, et al. Evaluation of the potential of squash pumpkin by-products (seeds and shell) as sources of antioxidant and bioactive compounds[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(2): 1008-1015.
- [18] 静玮, 苏子鹏, 林丽静. 澳洲坚果焙烤过程中挥发性成分的特征分析[J]. 热带作物学报, 2016, 37(6): 1224-1231.
JING W, SU Z P, LIN L J. Volatile profiling of macadamia nuts during roasting[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(6): 1224-1231. (in Chinese)
- [19] PEIRETTI P G, MEINER G, GAI F, et al. Antioxidative activities and phenolic compounds of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seeds and amaranth (*Amaranthus caudatus*) grain extracts[J]. Natural Product Research, 2017, 31(18): 2178-2182.
- [20] 郭刚军, 胡小静, 彭志东, 等. 不同压榨方式澳洲坚果油品质及抗氧化活性比较[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 125-132.
GUO G J, HU X J, PENG Z D, et al. Comparison of quality and antioxidant activity of press-processed macadamia (*Macadamia ternifolia* F. Muell.) oils[J]. Food Science, 2018, 39(13): 125-132. (in Chinese)
- [21] NOOSHKAM M, MADADLOU A. Maillard conjugation of lactulose with potentially bioactive peptides[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 831-836.
- [22] MICHALSKA A, AMIGO-BENAVENT M, ZIELINSKI H, et al. Effect of bread making on formation of Maillard reaction products contributing to the overall antioxidant activity of rye bread[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(1): 123-132.
- [23] JOGIHALLI P, SINGH L, SHARANAGAT V S. Effect of microwave roasting parameters on functional and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 223-233.
- [24] NOOSHKAM M, VARIDI M, BASHASH M. The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 644-660.
- [25] 彭倩. 澳洲坚果蛋白组分及分离蛋白的理化与功能性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [26] 李莹莹, 吴彩娥, 杨剑婷, 等. 白果蛋白质提取及 SDS-PAGE 分析[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 36-40.
LI Y Y, WU C E, YANG J T, et al. Extraction and SDS-PAGE analysis of proteins from *Ginkgo biloba* seed[J]. Food Science, 2010, 31(22): 36-40. (in Chinese)
- [27] 刘成梅, 王芳, 钟俊桢, 等. 腰果蛋白的功能特性研究及其氨基酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 88-92.
LIU C M, WANG F, ZHONG J Z, et al. Functional properties and amino acid composition of cashew nut protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 88-92. (in Chinese)
- [28] 赵小龙, 刘大川. 棉籽分离蛋白的功能特性研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(1): 27-30.
ZHAO X L, LIU D C. Functional property of cottonseed protein isolate[J]. China Oils and Fats, 2015, 40(1): 27-30. (in Chinese)
- [29] WANG J M, NAVICHA W B, NA X K, et al. Preheat-induced soy protein particles with tunable heat stability[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127624.
- [30] NICOLAI T, DURAND D. Controlled food protein aggregation for new functionality[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2013, 18(4): 249-256.

(责任编辑: 金文苑)