

不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响

吴晓龙, 涂宗财, 胡月明, 王旭梅, 王辉

Effects of Different High-temperature Treatments on Physicochemical Properties and Taste Quality of Grass Carp Meat

WU Xiaolong, TU Zongcai, HU Yueming, WANG Xumei, and WANG Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声波和TGase对重组草鱼肉形成过程中理化性质的影响

Effects of Ultrasound and TGase on Physicochemical Properties of Grass Carp Meat during Restructuring

食品工业科技. 2020, 41(23): 30-36 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070024>

鲟鱼和草鱼鱼鳔酶溶性胶原蛋白的理化性质比较

Comparison of Physicochemical Properties of Pepsin-Soluble Collagens from Swim Bladders of Sturgeon(*Acipenser schrenckii*) and Grass Carp(*Ctenopharyngodon idella*)

食品工业科技. 2021, 42(15): 27-32 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110108>

草鱼头磷脂制备工艺优化及抗氧化性能分析

Preparation Technology Optimization and Antioxigenic Property Analysis of Phospholipids from Grass Carp Head

食品工业科技. 2020, 41(6): 149-154 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.06.025>

不同烹饪方式对草鱼肉挥发性风味成分的影响

Effects of Different Cooking Methods on Volatile Components of *Ctenopharyngodon idella* Meat

食品工业科技. 2024, 45(10): 263-272 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070063>

恒温发酵温度对发酵牦牛肉灌肠理化性质的影响

Effects of Constant Fermentation Temperatures on Physicochemical Properties of Fermented Yak Meat Sausage

食品工业科技. 2019, 40(5): 42-47 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.05.008>

不同贮藏温度下草鱼内脏鱼油品质变化

Quality Changes of Grass Carp Visceral Fish Oil under Different Storage Temperatures

食品工业科技. 2023, 44(1): 362-368 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040031>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴晓龙, 涂宗财, 胡月明, 等. 不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 84–93.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110193

WU Xiaolong, TU Zongcai, HU Yueming, et al. Effects of Different High-temperature Treatments on Physicochemical Properties and Taste Quality of Grass Carp Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 84–93. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110193

· 研究与探讨 ·

不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响

吴晓龙¹, 涂宗财^{1,2}, 胡月明^{1,2,3}, 王旭梅^{2,4}, 王 辉^{1,*}

(1.南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室,江西南昌 330047;

2.江西师范大学生命科学学院国家淡水鱼加工技术研发专业中心,江西南昌 330022;

3.江西德上制药有限公司,江西宜春 331208;

4.江西师范大学健康学院,江西南昌 330022)

摘要: 本文旨在研究三种当前流行的高温处理方式(电烤、空气油炸和过热蒸汽)对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响,理化性质通过测量鱼肉的pH、持水力、色度值、硫代巴比妥酸反应物和蛋白羰基含量进行分析,滋味品质通过测量鱼肉的游离氨基酸含量和呈味核苷酸含量进行表征。结果表明,相较于对照组的生草鱼肉,经不同高温处理加工过的草鱼肉其理化性质方面的各项指标有着不同程度的显著升高($P<0.05$),初步揭示了在不同的高温环境下鱼肉品质会发生不同的改变。之后通过对游离氨基酸和呈味核苷酸这两种典型滋味物质的统计分析得出了草鱼肉在经过三种高温处理后其滋味物质的含量也会显著增加($P<0.05$),其中空气油炸组变化的最为明显,其游离氨基酸和呈味核苷酸的最高含量可达338.78 mg/100 g和1050.61 mg/100 g,这使其在后期具有最高的鲜味程度。综合评定得出,三种处理在理化性质方面均没有产生不良表现,在滋味品质方面空气油炸组的表现要较好,说明经空气油炸处理的草鱼肉其食用品质更佳。

关键词: 草鱼肉, 高温处理, 理化性质, 氧化分析, 鲜味程度

中图分类号: TS254.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)19-0084-10

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2023110193](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110193)

本文网刊:



Effects of Different High-temperature Treatments on Physicochemical Properties and Taste Quality of Grass Carp Meat

WU Xiaolong¹, TU Zongcai^{1,2}, HU Yueming^{1,2,3}, WANG Xumei^{2,4}, WANG Hui^{1,*}

(1.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2.National Freshwater Fish Processing Technology Research and Development Center in College of Life Science of Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

3.Jiangxi Deshang Pharmaceutical Co., Ltd., Yichun 331208, China;

4.College of Health, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: This study aimed to study the effects of three current popular high-temperature treatments (electric roasting, air frying and superheated steam) on the physicochemical properties and taste quality of grass carp meat. Physicochemical properties were analyzed by measuring pH, water holding capacity, color value, thiobarbituric acid reactive substance and protein carbonyl content of fish meat. Taste quality was characterized by measuring the free amino acids content and flavor nucleotides content of fish meat. The results showed that compared with the raw grass carp meat in the control group, the

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2022YFD2100904)。

作者简介: 吴晓龙 (1999-), 男, 硕士, 研究方向: 水产品的加工和贮藏, E-mail: 2089690786@qq.com。

* 通信作者: 王辉 (1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农副产品加工及高值化利用, E-mail: wanghui00072@aliyun.com。

indexes of physicochemical properties of grass carp meat processed by different high-temperature treatments were significantly increased in different degrees ($P<0.05$), which preliminarily revealed that the quality of fish meat would change differently under different high-temperature environments. After that, through the statistical analysis of two typical taste substances, free amino acids and flavor nucleotides, it was concluded that the content of taste substances in grass carp meat would also increase significantly after three high-temperature treatments ($P<0.05$). Among them, the change of air frying group was the most obvious, and its highest contents of free amino acids and flavor nucleotides were up to 338.78 mg/100 g and 1050.61 mg/100 g, which made it have the highest umami degree in the later stage. According to the comprehensive evaluation, three treatments all did not produce adverse performance in terms of physicochemical properties, air frying group performed well in terms of taste quality, indicating that grass carp meat treated by air frying had better edible quality.

Key words: grass carp meat; high-temperature treatments; physicochemical properties; oxidation analysis; umami degree

草鱼被称为中国的“四大家鱼”之一,同时也是中国养殖规模最大的淡水鱼类^[1],在 2022 年其产量高达 575.5 万吨,占据了中国淡水鱼养殖总产量的 20% 左右。草鱼的肉质紧实,味道鲜美,营养丰富且全面,一直以来都深受人们的喜爱。例如,草鱼肉中蛋白质的氨基酸组成与人体组织蛋白非常相似,包含了丰富的必需氨基酸,被认为是人类所需优质蛋白质的重要来源之一;草鱼肉中脂肪含量也不高,且多为不饱和脂肪酸,易于人体消化吸收^[2];先前的研究还证明了草鱼肉中富含多种矿物质和微量元素,对人体生长和机体健康大有益处^[3],这些都充分说明了草鱼具有着极高的食用价值。现如今有关草鱼的各种加工工艺层出不穷,但人们对其的认知仍相当有限,因此有必要对相关的草鱼制品进行深入研究,了解这些加工方式会对鱼肉的食用品质的影响,并比较不同加工方式间的差异情况,以丰富消费者的认知。

高温处理是一种广泛应用于水产品的加工手段,通过高温可以使蛋白质变性、淀粉糊化,提高食品的消化率,同时也可以充分杀灭有害微生物以确保食用安全性^[4]。现有的高温处理方式主要包括蒸制、煮制、炸制、烤制等,不同的处理方式由于传热机制的差异会对鱼肉的品质造成不同程度的影响^[5],处理不当则都会导致鱼肉品质变差,影响可食用性以及降低消费者的好感。随着技术的不断进步以及消费者的需求越来越多样化,相关产业开始追求产品的多元化发展,不再专注于那些传统的高温处理手段,这些因素促使了一些新技术的诞生。在烤制方面,电烤的出现极大地节省了传统木炭烤制所需的时间和精力,而且不会产生大量的油烟,低碳环保^[6]。张艳等^[7]通过将鲤鱼进行电烤和碳烤处理后发现虽然电烤处理会少一些挥发性物质,但适度电烤会使鲤鱼肌肉组织的持水性更优。在炸制方面,新兴的空气油炸技术利用高速空气循环的原理将热空气变成“油”以快速加热和脆化食物,充分降低了食物的含油量^[8]。丁怡萱等^[9]通过比较分析油炸和空气油炸对带鱼品质的影响后发现气炸带鱼的质构特性较好,而且其氨基酸组成情况属于优质蛋白的类型。在蒸制方面,过热蒸汽相比于传统的蒸汽加热具有着更高的传热系数,同时它还

能将周围的水分完全蒸发为干饱和蒸气,避免了会因水分残留而造成的口感问题^[10]。目前关于水产品过热蒸汽加工的研究报道很少,需要进行相关的实验对此进行补充。同时关于这些新技术的对比研究的也较少,各种处理方式的优越性尚不明确,因此有很大的研究意义。

本研究将会针对上述三种新发展起来的技术,系统分析它们对草鱼肉的理化性质和滋味品质的影响规律。理化性质研究根据 pH、持水性、色度、脂质氧化和蛋白氧化指标进行讨论;滋味品质选用游离氨基酸和呈味核苷酸这两个滋味形成的重要前体物质为指标,可有效地对滋味进行表征^[11]。本研究有助于详细地了解草鱼肉在三种处理方式下草鱼各项品质指标的变化情况,为提高草鱼肉整体品质的方法选择提供有价值的参考,对烹饪应用和相关加工工业的生产具有潜在的指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜活草鱼(每条约 900 g) 江西省南昌市天虹商场;硫代巴比妥酸(2-thiobarbituric acid, TBA)、2,4-二硝基苯肼(2,4-dinitrophenyl hydrazine, 2,4-DNPH) 纯度>98%, 上海麦克林生化科技股份有限公司;三氯乙酸、甲醇、氢氧化钠、氯化钠、盐酸胍、尿素 均为分析纯, 广州市西陇化工有限公司;5 种核苷酸标准品、17 种氨基酸标准品 纯度≥99%, 上海源叶生物科技有限公司。

SH253B 型蓝牙温度探针 西安郎恩机电设备有限公司;K4 型电烤箱 中山格兰仕日用电器有限公司;RS-AF62L 型空气炸锅 合肥荣事达集团有限责任公司;ZKMB-28GB17 型过热蒸汽箱 中山华帝厨卫有限公司;PHS-3E 型酸度计 上海雷磁传感器科技有限公司;CM-23D 型色度仪 日本柯尼卡美能达公司;S-433D 型氨基酸分析仪 德国赛卡姆公司;L-2400 型高效液相色谱仪 日本株式会社日立制作所。

1.2 实验方法

1.2.1 草鱼肉的处理 将草鱼砍掉头部和尾部,剥去内脏和鱼皮后,用流水冲洗干净,顺着背部骨架切成

相似大小的鱼块(3 cm×3 cm×1.5 cm)。随后将这些鱼块随机分为 13 组以消除个体差异。其中 1 组为生品对照组,其余 12 组用于电烤、空气油炸、过热蒸汽。将分好组的鱼块分别均匀地放置于电烤箱、空气炸锅和过热蒸汽箱中,加热温度统一设置为 200 °C,然后进行 5、10、15、20 min 的高温处理,三种设备在使用前都需预热 10 min,使用蓝牙数字温度探针实时监控肉样中心的温度变化。样品的制备重复三次,处理好的样品冷却至室温后在短时间内尽快分析完成。

1.2.2 pH 测定 参照国标 GB 5009.237-2016^[12] 中食品 pH 的测定方法,稍加修改。取各自处理组的 3 g 鱼肉剁碎放入烧杯中,加入 30 mL 超纯水,高速均质 30 s 后静置 20 min,用滤纸过滤取澄清液,使用酸度计测定其 pH,平行 3 次。

1.2.3 持水性测定 参考张一鸣等^[13] 的方法进行适当的调整。将各组的鱼肉取 3 g 用双层定性中速滤纸包裹,置于 50 mL 离心管中,离心 10 min(8000 r/min, 4 °C)。离心结束后去除离心管内的滤纸,再次称量鱼肉的质量,平行 3 次。按照下式计算各组鱼肉的持水力:

$$\text{持水力}(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

式中, m_1 为离心前鱼肉的重量(g); m_2 为离心后鱼肉的重量(g)。

1.2.4 色度测定 使用色度仪测量鱼肉的颜色,在每个样品的不同的位置测量 8 次。记录样品的亮度 L^* 值、红绿度 a^* 值和黄蓝度 b^* 值。设备在测量前需使用一个标准的白板进行校准。

1.2.5 脂质氧化测定 参考李红月等^[14] 的方法,略加修改。称取 5 g 鱼肉样品,绞碎后置于锥形瓶中,加入 25 mL 7.5% 的三氯乙酸(含有 0.1% EDTA),磁力搅拌 30 min 后用双层滤纸将混合物过滤。吸取 5 mL 的清液于比色管中,往里加入 5 mL 0.02 mol/L TBA 溶液,在水浴锅内 90 °C 水浴加热 40 min。待溶液冷却至室温后,于 532 nm 波长处测定吸光度。以 1,1,3,3-四乙氧基丙烷做标准曲线,重复测量三次。

1.2.6 蛋白氧化测定

1.2.6.1 肌原纤维蛋白提取 依据 Qin 等^[15] 方法,取各组的鱼肉 10 g,加入 5 倍体积预先配好的 Tris-HCl 缓冲溶液(0.1 mol/L, pH7.2),以 8000 r/min 混匀均质 60 s; 离心(5000 r/min, 4 °C, 10 min)取沉淀,该过程反复重复 3 次; 取最后一次沉淀,加入 5 倍体积的 Tris-HCl 缓冲液(含 0.6 mol/L NaCl, pH7.2),以 8000 r/min 混匀均质 60 s,最后离心(8000 r/min, 4 °C, 10 min)取得的上清液即为肌原纤维蛋白溶液。肌原纤维蛋白溶液的浓度采用双缩脲法进行测定,取 1 mL 提取的肌原纤维蛋白溶液于避光的棕色试管中,加入 4 mL 临时制备的双缩脲试剂,充分混合后在 30 °C 条件下水浴 30 min,结束后在波长为

540 nm 处测其吸光度,对照蛋白含量的标准曲线求肌原纤维蛋白溶液的质量浓度。为避免蛋白质在提取过程中受热变性,以上操作均在低温环境下进行,肌原纤维蛋白溶液需在-80 °C 冰箱中贮藏备用,2 d 内使用。

1.2.6.2 蛋白羰基值的测定 使用 DNPH 比色法^[16],将各组的蛋白浓度调整至 2 mg/mL,取 1 mL 蛋白液于避光的棕色试管中,加入 1 mL 10 mmol/L 的 DNPH 溶液(用 2 mol/L 的 HCl 溶解),30 °C 下水浴 1 h(每 10 min 摆晃混匀 1 次)。充分反应后,每管加入 3 mL 40%(w/v)的三氯乙酸溶液以沉淀蛋白。静置 10 min 后,离心(8000 r/min, 4 °C, 10 min)弃去上层清液。用 1 mL 乙酸乙酯:乙醇(v/v=1:1)洗涤沉淀以去除未反应的 DNPH,然后 8000 r/min 离心 10 min,重复上述洗涤过程至上清液为无色。用 3 mL 6 mol/L 盐酸胍溶液溶解蛋白沉淀,待沉淀溶解完全后,在 370 nm 波长处测其吸光度。空白组用 1 mL 2 mol/L 的 HCl 代替蛋白溶液,后续操作相同。利用分子吸光系数 22000 L/mol·cm 计算羰基含量。实验重复三次,结果表示为 nmol 羰基/mg 蛋白,计算公式如下:

$$\text{羰基含量}(\text{nmol}/\text{mg}) = \frac{A \times V}{C \times d \times M} \times 10^6$$

式中, A 为样品溶液的吸光度; V 为反应液终体积(mL); C 为分子吸光系数 22000 L/mol·cm; d 为比色皿的光程(cm); M 为蛋白质量(mg); 10^6 为单位换算系数。

1.2.7 游离氨基酸的测定 参考张美等^[17] 的方法略加修改,各组鱼肉样品取 5 g 放入 50 mL 离心管中,加入 30 mL 10% 的三氯乙酸 8000 r/min 均质 2 min,超声处理 10 min。在 4 °C 环境中静置 2 h 后,离心收集上清液(4 °C, 8000 r/min, 10 min),溶液过 0.22 μm 的微滤膜后,用氨基酸分析仪分析测定样品溶液中游离氨基酸的含量。

分析条件: 色谱柱尺寸为 4.6 mm×150 mm, 柱温 57 °C, 缓冲溶液流速 0.4 mL/min, 反应液(茚三酮试剂)流速 0.35 mL/min, 检测波长 570 nm, 进样量 20 μL。

1.2.8 呈味核苷酸的测定 依据 Zhang 等^[18] 的描述,各组鱼肉样品取 5 g 放入 50 mL 离心管中,加入 20 mL 10% 高氯酸 8000 r/min 均质 2 min 后,离心(4 °C, 8000 r/min, 10 min)收集上清液。再用 10 mL 5% 的高氯酸洗涤沉淀物,重复上述离心操作两次,合并三次的上清液。用 6 mol/L 和 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节溶液的 pH 为 6.5,然后用超纯水定容至 50 mL,过 0.22 μm 的微滤膜后即可进行高效液相色谱法分析。

分析条件: 色谱柱尺寸 4.6 mm×250 mm, 柱温 28 °C; 流动相 A 为 0.02 mol/L KH₂PO₄+0.02 mol/L K₂HPO₄(v:v=1:1), 流动相 B 为 90% 的 A 液+10%

甲醇, 流速为 0.7 mL/min; 检测波长 254 nm; 进样量 10 μ L。洗脱程序为 0~14 min: 100% A, 14~18 min: 75% A+25% B, 18~25 min: 15% A+85% B, 25~40 min: 100% B。

1.2.9 味觉活性值(taste activity value, TAV)计算
通过进一步计算 TAV 以确认各种滋味物质对鱼肉味道的贡献, 计算公式如下:

$$TAV = C/T$$

式中, C 代表滋味物质的绝对浓度(mg/100 g); T 代表该滋味物质的阈值(mg/100 g)。一般来说, 当 $TAV < 1$ 时, 表示该物质对滋味贡献不大, 当 $TAV > 1$ 时, 表示该物质对滋味贡献较大。

1.3 数据处理

实验数据以平均值±标准差表示, 并通过 ISM SPSS Statistics 22 软件进行显著性分析。 $P < 0.05$ 被认为差异有统计学意义。处理后的数据和图表由 Excel 2016 和 Origin 2019 绘制。

2 结果与分析

2.1 内部温度的变化

三种高温处理过程中鱼片内部温度的变化差异如图 1 所示。可以看出随着处理时间的延长, 鱼片的内部温度会逐渐升高至约 95 $^{\circ}$ C, 随后达到恒定。这可能是因为 200 $^{\circ}$ C 的高温使鱼片内部的水分被大量蒸发, 吸收周围热量的同时又形成了一层水蒸气, 导致内部温度被稳定在接近水的沸点。在三种处理方式中, 过热蒸汽组具有最快的升温速率, 仅用 6 min 就达到了恒温, 电烤组的升温速率最慢, 在 12 min 时其内部温度才开始趋于平缓。造成这种差异的主要原因是由于传热介质的不同导致的, 过热蒸汽具有极高的热容(约为 2.01 J/g· $^{\circ}$ C), 因此对流传热速率较高^[19]。空气油炸和烤制虽然都是以热空气作为传热介质, 但空气炸锅配置了特定的风扇使得热空气能够高速循环流动, 对食材的穿透力强, 所以其传热效率要比电烤箱高。

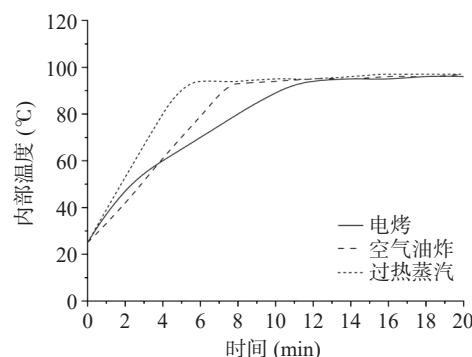


图 1 不同高温处理过程中草鱼肉内部温度的变化

Fig.1 Changes of internal temperature in grass carp during different high temperature treatments

2.2 pH 分析

pH 是判定肉制品安全性的一个重要指标, 与鱼

肉的理化性质有着密切的联系。在高温加热的过程中, 蛋白质及脂肪会发生一定的变性和降解, 进而影响 pH 变化。由图 2 可以看出, 三种加热方式在前期都显著提高了鱼肉的 pH($P < 0.05$), 可能是因为高温破坏了蛋白质中的化学键, 使得酸性基团减少^[20]。空气油炸组表现的尤为明显, 最高可达 7.04, 表明其酸性基团损失较多。后期可能是由于部分脂肪水解为脂肪酸, 导致 pH 有所下降, 空气油炸组的 pH 在 10 min 后开始显著降低($P < 0.05$), 说明其后期生成的脂肪酸量要多于其他两组^[21]。电烤组和过热蒸汽组的鱼肉在 5~20 min 的处理时间段中 pH 的变化程度不大, 且两组间基本无显著差异($P > 0.05$), 表明相较于另外两组, 空气油炸处理会使鱼肉品质发生较大幅度的变化。

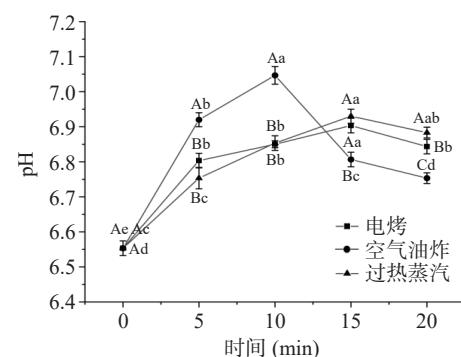


图 2 不同高温处理对草鱼 pH 的影响

Fig.2 Influence of different high temperature treatments on pH of grass carp

注: 不同大写字母表示同一时间不同加热方式间差异显著, $P < 0.05$; 不同小写字母表示同一加热方式不同加热时间差异显著, $P < 0.05$; 图 3~图 5 同。

2.3 持水性分析

肉的持水力是指其在受到外力作用时保持自身水分, 阻止水分渗出的能力^[22]。持水力的大小是衡量肉制品质量的主要指标之一, 通常肌肉的嫩度、多汁性、质构特性、蛋白变性情况等都与肌肉的持水性有关, 因此持水力有着重要的考察价值^[23]。由图 3 可知, 不同高温处理方式都显著提升了草鱼肉的持水性($P < 0.05$), 这是因为生鱼肉中含有较多的自由水,

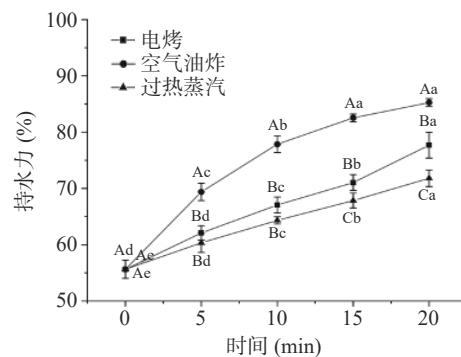


图 3 不同高温处理对草鱼持水力的影响

Fig.3 Influence of different high temperature treatments on water holding capacity of grass carp

其持水性会偏低,而随着加热过程中自由水大量流失,肌肉组织蛋白中的三维网状结构收缩,持水性随之逐渐增强^[24]。可以看出空气油炸组的持水性显著较高($P<0.05$),在处理20 min后其持水力高达85.24%,其次是电烤组和过热蒸汽组,分别为77.68%和71.80%,表明空气油炸组的鱼肉自由水损失程度最大,使得其肌肉组织结构的收缩程度最大。

2.4 色度分析

食品的颜色会在很大程度上影响消费者的购买欲望,以水产品为例,人们往往会根据其外观颜色来判断其大致质量属性,而适度的热处理会显著改善肉的色泽。由表1可以看出,不同处理条件下草鱼肉的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值均显著升高($P<0.05$)。随着处理时间的延长, L^* 值在5 min后开始呈下降趋势,而 a^* 值和 b^* 值则始终保持上升趋势。

表1 不同高温处理方式对草鱼表面色泽的影响

Table 1 Influence of different high temperature treatments on the color of the surface of grass carp

处理方式	时间(min)	L^*	a^*	b^*
生鱼肉	0	55.89±0.48 ^{d,e,d}	-3.07±0.37 ^{d,e,c}	3.44±0.46 ^{e,e,d}
	5	78.48±0.70 ^{Ba}	-2.05±0.29 ^{ABc}	12.51±0.55 ^{Cd}
	10	75.50±1.16 ^{Bb}	-0.74±0.31 ^{ABb}	14.93±0.34 ^{Bc}
	15	74.28±0.55 ^{Bb}	-1.12±0.18 ^{Bb}	16.92±0.74 ^{Bb}
	20	72.21±0.64 ^{Bc}	0.49±0.16 ^{Ba}	18.65±0.29 ^{Ba}
	5	79.33±0.47 ^{Ba}	-1.85±0.12 ^{Ad}	15.31±0.39 ^{Ad}
空气油炸	10	76.42±0.36 ^{Bb}	-1.22±0.13 ^{Ac}	16.52±0.41 ^{Ac}
	15	72.69±0.32 ^{Cc}	0.65±0.08 ^{Ab}	18.99±0.26 ^{Ab}
	20	68.32±0.53 ^{Cd}	1.70±0.21 ^{Aa}	24.25±0.42 ^{AA}
	5	83.98±0.64 ^{AA}	-1.63±0.07 ^{Ab}	13.47±0.47 ^{Bc}
	10	79.73±0.51 ^{Ab}	-1.58±0.05 ^{Ab}	15.04±0.44 ^{Bab}
	15	76.50±0.48 ^{Ac}	-1.25±0.06 ^{Bab}	15.95±0.24 ^{BCa}
过热蒸汽	20	78.77±0.37 ^{Ab}	-0.85±0.21 ^{Ca}	14.60±0.51 ^{Cb}

注:不同大写字母表示相同加热时间不同加热方式间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同加热方式不同加热时间差异显著($P<0.05$);表2、表3同。

L^* 值在前期的剧烈增加可能是由于肌原纤维蛋白和肌红蛋白在高温下的变性,使得鱼肉的颜色迅速变白,而且此时肉的水分还未损失太多,所以具有较高的亮度^[25]。可以看出在第5 min时,经过热蒸汽处理的鱼肉其 L^* 值明显最大,为83.98,其次是空气油炸处理和电烤处理,且二者的差异不显著($P>0.05$),分别为79.33和78.48,这表明过热蒸汽的传热效果最高,这与上述内部温度的变化情况一致。5 min后 L^* 值降低则是因为鱼肉中的水分大量蒸发,使得鱼肉发生表面失水现象,对光的反射减弱,导致 L^* 值降低^[26],但过热蒸汽组依旧保持着最高的 L^* 值。 a^* 值增加可能是由于高温环境下亚铁肌红蛋白会被氧化成高铁肌红蛋白,同时肌红蛋白的溶解度也会提升,导致更深的红色^[27]。空气油炸组后期有着最高的 a^* 值,为1.70,表明其氧化程度最深,电烤组和过热蒸汽组的 a^* 值分别为0.49和-0.85,表明其氧化程度不

大。 b^* 值增加与脂肪氧化反应密切相关^[28],电烤、空气油炸和过热蒸汽组三种处理方式的 b^* 值在20 min时分别为18.65、24.25、14.60,由此可知空气油炸处理的鱼肉脂肪氧化程度最高,过热蒸汽处理则最弱。

2.5 脂质氧化分析

通过计算硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substance, TBARS),得出脂质氧化过程中二级产物丙二醛(malondialdehyde, MDA)的含量,以此来反映出肉制品在热处理过程中脂质氧化的程度。由图4可知,空气油炸组和过热蒸汽组在前10 min,电烤组在前15 min的过程中,鱼肉的TBARS值呈逐渐增加的趋势,其中空气油炸组显著较高($P<0.05$),其最高可达1.03 mg MDA/kg,其次是电烤组和过热蒸汽组,最高可达1.00和0.77 mg MDA/kg,与色差 b^* 值的趋势一致。因为随着鱼肉温度的不断上升,脂肪氧化加快,氧化产生的初级产物迅速分解为次级产物MDA等,导致TBARS值显著增加^[29]。而后随着处理时间的延长,空气油炸组和过热蒸汽组在10 min后,电烤组在15 min后,TBARS值开始下降,这可能是由于MDA在长时间的高温刺激下,倾向于与肉中含有氨基的物质(如蛋白质、氨基酸和磷脂类物质等)发生反应^[30]。可以看出也是空气油炸组的反应强度最大,在处理20 min时其TBARS值降到了0.71 mg MDA/kg,低于电烤组的0.80 mg MDA/kg。需要注意的是,鱼肉中MDA的含量不能超过2.2 mg/kg,否则会产生难闻的气味,而且MDA是一种致癌物,含量过多会对人体健康有害^[31]。三种处理方式在0~20 min的处理过程中鱼肉的MDA含量均未超过限值,表明不会轻易导致鱼肉的脂质氧化上升到对人体产生负面影响的程度。

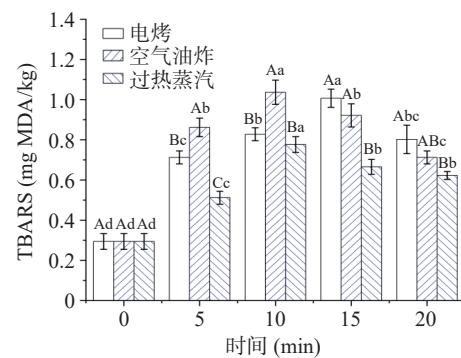


图4 不同高温处理对草鱼TBARS值的影响

Fig.4 Influence of different high temperature treatments on TBARS of grass carp

2.6 蛋白氧化分析

羰基含量是蛋白氧化的重要指标之一,在发生氧化时,蛋白质中的赖氨酸、精氨酸、苏氨酸等氨基酸残基的侧链容易发生脱氨反应,并转化为羰基衍生物,因此羰基含量越高,蛋白氧化程度越大^[32]。由图5可知,相比于对照组,不同处理方式都显著提高

了鱼肉蛋白的羰基含量($P<0.05$)。其中, 电烤组和过热蒸汽组一直显著高于空气油炸组($P<0.05$), 且电烤组和过热蒸汽组在 0~15 min 的处理过程中差异不显著($P>0.05$)。在处理 20 min 后电烤组的羰基含量达到 6.59 nmol/mg, 显著高于过热蒸汽组 6.04 nmol/mg($P<0.05$)。这种差异的出现表明各组的鱼肉中发生脱氨反应的氨基酸数量不同, 进而导致羰基产量的不同。关于三种处理方式下的鱼肉其羰基含量始终都呈上升趋势, 是因为长时间的高温环境会使脂质氧化所产生的部分 MDA 也间接参与了蛋白质的氧化, 这在上述 TBARS 值的分析中提到过, 由此导致了羰基含量的进一步增加, 但并没有改变不同处理方式间的差异情况。除了一些必需氨基酸损失之外, 过度的羰基化还会使羰基产物之间形成交联, 生成席夫碱结构和羟醛缩合产物, 促使蛋白质聚集进而影响消化性, 由此可知空气油炸处理对鱼肉的营养价值影响最小。蛋白氧化后其凝胶结构也会变松散, 无法形成致密稳定的网状结构, 进而影响质构特性^[33], 这也进一步解释了在上述的测量中空气油炸处理过的鱼肉持水性更强。

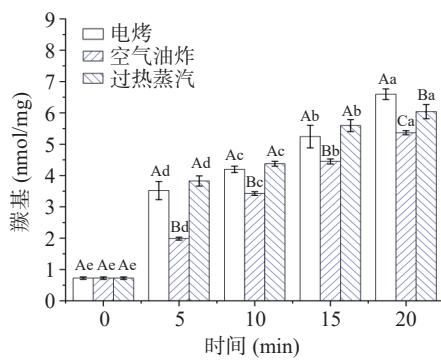


图 5 不同高温处理对草鱼羰基含量的影响

Fig.5 Influence of different high temperature treatments on carbonyl content of grass carp

2.7 游离氨基酸分析

游离氨基酸在鱼肉香味的形成中有着重要的贡献作用, 不同的氨基酸由于其不同的结构会形成不同的味道, 因此鱼肉中所含氨基酸的种类和含量的不同, 会造成滋味的差异性^[34]。同时, 不同种类氨基酸含量的变化也会导致蛋白质结构发生相应的改变, 进而影响食物的营养特性^[35]。如表 2 所示, 鱼肉样品中共检测到 17 种游离氨基酸, 根据味道属性可将其分为鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸三种, 各种氨基酸的阈值来源参考了张美等^[17]的报道。可以看出三种处理方式下的鱼肉中都是苦味氨基酸的含量最高, 其次为甜味氨基酸, 鲜味氨基酸的含量最少。各类氨基酸的含量基本都在 0~15 min 的处理过程中呈逐渐升高的趋势, 这是因为在加热过程中蛋白质受热分解会释放出大量的游离氨基酸, 同时鱼肉内部水分也被大量蒸发, 使得游离氨基酸的浓度显著增大。三种处理方式都使鱼肉氨基酸含量在 15 min

时达到最大, 空气油炸组积累的最多, 总氨基酸含量高达 338.78 mg/100 g, 电烤组和过热蒸汽组差异不显著($P>0.05$), 含量分别为 283.84 mg/100 g 和 274.64 mg/100 g, 这对应了蛋白氧化的结果, 表明蛋白氧化程度越高, 其释放的氨基酸物质越少。而后可能是由于长时间的加热使鱼肉内部汁液流失量过大, 溶解于其中的游离氨基酸也随之损失, 但依旧是空气油炸组含量最高, 电烤组和过热蒸汽组差异不显著($P>0.05$)。

虽然三种处理方式都使鱼肉中苦味氨基酸占比较多, 但并不影响鱼肉的味道, 苦味氨基酸会与甜味氨基酸和鲜味氨基酸结合以增加鱼肉味道的丰富度, 改善口感^[36]。鱼肉中的苦味氨基酸以 His 和 Lys 为主, His 基本在 28.00~38.00 mg/100 g 之间波动, Lys 基本在 43~53 mg/100 g 之间波动, 到后期空气油炸组含量最高, 电烤组次之, 过热蒸汽组要显著低于另外两组($P<0.05$)。苦味氨基酸中还包含了 6 种人体必需的氨基酸, 以 Lys 和 Leu 为主, 含量丰富, 极大地提高了鱼肉蛋白质的营养价值。甜味氨基酸可以为鱼肉提供良好的味道基础, 其中 Gly 和 Ala 不仅可以提供甜味, 还可以减少苦味, 去除不愉快的味道, 并改善整体味道, 可以看出各组 Gly 和 Ala 在甜味氨基酸中的占比都达到了 90% 左右, 表明它们对鱼肉的甜味做出了极大的贡献。空气油炸组的甜味氨基酸含量明显最高, 且一直保持增加的趋势, 到 20 min 时达到 129.53 mg/100 g, 电烤组和过热蒸汽组在 15 min 时含量达到最高, 分别为 94.38 和 105.69 mg/100 g, 而后因为汁液流失的缘故含量有所下降。虽然鲜味氨基酸的所占比例较小, 但能赋予水产品独特的风味, 鲜味不是单一的味道, 它可以平衡酸、甜、苦、咸四种味道, 增强食物的总体口感^[37]。可以注意到鱼肉中的鲜味氨基酸基本由 Glu 组成, 空气油炸组在 15 min 时含量达到 44.58 mg/100 g, 其次为电烤组 38.14 mg/100 g, 最后是过热蒸汽组 28.18 mg/100 g, 表明空气油炸处理可以极大地提高鱼肉的鲜味程度。

2.8 呈味核苷酸分析

核苷酸类化合物是评价水产品滋味的重要指标, 其分解顺序为 ATP→ADP→AMP→IMP→HxR→Hx, ATP 是其余核苷酸的前体物质, 它们共同影响着水产品的滋味^[38]。由表 3 可知(阈值来源参考张美等^[17]的报道), 经过不同高温处理后鱼肉中总核苷酸含量都显著升高($P<0.05$), 其中空气油炸组的上升趋势最明显, 到 20 min 时达到 1050.61 mg/100 g, 其次是过热蒸汽组和电烤组, 它们在 15 min 时含量达到最大, 分别为 540.66 和 300.09 mg/100 g。虽然也是以空气油炸处理的最为突出, 但还是与游离氨基酸的趋势有差异, 说明呈味核苷酸的含量可能受多种因素的影响, 有待进一步探讨。

ATP 是活鱼能量的生产来源, 在鱼死后就会逐

表 2 不同高温处理方式下草鱼肉游离氨基酸含量(mg/100 g)
Table 2 Free amino acids content of grass carp at different high temperature treatments (mg/100 g)

味道	氨基酸	阈值	生鱼肉	电烤				
				5 min	10 min	15 min	20 min	
鲜味	天冬氨酸Asp	100	0.46±0.03 ^{c,a,b}	0.36±0.02 ^{Ad}	0.99±0.01 ^{Aa}	0.55±0.02 ^{Ab}	0.38±0.01 ^{Bd}	
	谷氨酸Glu	30	13.75±0.60 ^{c,e,d}	22.22±1.52 ^{Ab}	37.01±2.15 ^{Aa}	38.14±2.28 ^{Ba}	15.46±0.86 ^{Bc}	
	苏氨酸Thr*	260	1.10±0.11 ^{b,b,b}	1.15±0.20 ^{Ab}	1.83±0.16 ^{Aa}	1.47±0.24 ^{Bab}	1.23±0.11 ^{ABb}	
甜味	丝氨酸Ser	150	4.63±0.21 ^{b,b,cd}	3.37±0.29 ^{Cc}	6.10±0.35 ^{Aa}	6.03±0.15 ^{Ba}	3.20±0.36 ^{Bc}	
	甘氨酸Gly	130	31.69±0.74 ^{b,b,a}	29.67±0.40 ^{Ac}	26.24±0.86 ^{Bd}	26.72±1.11 ^{Cd}	36.80±1.05 ^{Ba}	
	丙氨酸Ala	60	41.87±1.50 ^{b,c,b}	39.04±1.22 ^{ABb}	53.84±2.40 ^{Ba}	56.59±0.97 ^{Ba}	42.17±1.02 ^{Bb}	
苦味	脯氨酸Pro	300	3.38±0.39 ^{a,ab,c}	2.60±0.26 ^{ABb}	3.61±0.18 ^{Ba}	3.57±0.06 ^{Ba}	3.38±0.32 ^{Ba}	
	缬氨酸Val*	40	8.17±0.03 ^{b,b,a}	5.67±0.09 ^{Bc}	9.40±0.18 ^{Aa}	9.67±0.03 ^{Ba}	5.78±0.02 ^{Bc}	
	蛋氨酸Met	30	3.18±0.03 ^{b,d,a}	2.87±0.03 ^{ABc}	3.86±0.18 ^{Aa}	3.76±0.03 ^{ABa}	2.80±0.02 ^{Bc}	
苦味	异亮氨酸Ile*	90	8.43±0.03 ^{c,c,b}	6.15±0.11 ^{Bd}	9.88±0.12 ^{Ab}	10.21±0.01 ^{Ba}	6.15±0.02 ^{Bd}	
	亮氨酸Leu*	190	13.05±0.04 ^{c,c,b}	9.78±0.15 ^{Bd}	15.59±0.22 ^{Ab}	16.06±0.01 ^{Ba}	9.86±0.05 ^{Bd}	
	酪氨酸Tyr*	—	7.82±0.02 ^{c,b,b}	4.80±0.09 ^{Bc}	9.17±0.13 ^{Ab}	9.55±0.05 ^{Ba}	5.52±0.03 ^{Bd}	
苦味	苯丙氨酸Phe*	90	6.00±0.01 ^{c,c,b}	4.75±0.09 ^{Bd}	7.21±0.12 ^{Ab}	7.48±0.06 ^{Ba}	4.32±0.01 ^{Bc}	
	组氨酸His	20	29.74±2.40 ^{b,c,bc}	25.94±0.38 ^{Ac}	34.48±0.48 ^{Aa}	35.22±0.39 ^{Ba}	33.95±0.05 ^{Ba}	
	赖氨酸Lys*	50	44.97±0.93 ^{c,d,bc}	43.77±0.58 ^{Bc}	49.03±0.39 ^{Aa}	49.44±0.56 ^{Ba}	47.17±0.37 ^{Bb}	
苦味	精氨酸Arg	50	8.53±0.21 ^{a,c,a}	5.50±0.22 ^{Bc}	8.57±0.30 ^{Aa}	8.83±0.02 ^{Ba}	7.13±0.06 ^{Bb}	
	胱氨酸Cys	—	0.69±0.04 ^{a,a,a}	0.33±0.05 ^{Ac}	0.52±0.04 ^{Ab}	0.55±0.05 ^{Ab}	0.28±0.01 ^{Ac}	
	UAA	—	14.21±0.59 ^{c,e,d}	22.58±1.50 ^{ABb}	38.00±2.12 ^{Aa}	38.69±2.26 ^{Ba}	15.84±0.84 ^{Bc}	
苦味	SAA	—	82.67±2.65 ^{c,d,b}	75.83±2.01 ^{Ad}	91.62±3.52 ^{Bab}	94.38±2.45 ^{Ba}	86.78±2.54 ^{Bbc}	
	BAA	—	130.58±3.54 ^{b,c,b}	109.56±1.55 ^{Bd}	147.71±2.05 ^{Aa}	150.77±1.17 ^{Ba}	122.96±0.48 ^{Bc}	
	EAA	—	89.54±0.96 ^{b,c,b}	76.07±1.11 ^{Bd}	102.11±1.05 ^{Aa}	103.88±0.75 ^{Ba}	80.03±0.50 ^{Bc}	
苦味	TFAA	—	227.46±7.03 ^{b,d,b}	207.97±5.46 ^{Bc}	277.33±7.69 ^{Aa}	283.84±5.42 ^{Ba}	225.58±3.92 ^{Bb}	
空气油炸								
氨基酸	5 min	10 min	15 min	20 min	5 min	10 min	15 min	20 min
天冬氨酸Asp	0.21±0.03 ^{Bc}	0.23±0.01 ^{Bc}	0.39±0.02 ^{Bb}	0.36±0.01 ^{Bb}	0.37±0.03 ^{Ac}	0.24±0.01 ^{Bd}	0.47±0.03 ^{ABb}	0.56±0.02 ^{AA}
谷氨酸Glu	18.89±3.21 ^{Bd}	23.81±0.31 ^{Bc}	44.58±1.21 ^{Aa}	34.41±0.54 ^{Ab}	24.66±0.60 ^{Ab}	16.25±1.17 ^{Ccd}	28.18±0.51 ^{Ca}	16.82±2.06 ^{Bc}
苏氨酸Thr*	0.61±0.15 ^{Bc}	0.82±0.08 ^{Bbc}	1.11±0.27 ^{Bb}	1.57±0.13 ^{Aa}	0.81±0.17 ^{Bb}	0.84±0.21 ^{Bb}	1.97±0.15 ^{Aa}	1.61±0.17 ^{AA}
丝氨酸Ser	4.13±0.11 ^{Bb}	6.65±0.36 ^{Aa}	6.19±0.91 ^{Ba}	3.91±0.36 ^{Bb}	5.94±0.12 ^{Ab}	4.44±0.11 ^{Bd}	7.10±0.20 ^{Aa}	5.09±0.33 ^{Ac}
甘氨酸Gly	26.26±2.78 ^{Bc}	31.34±2.02 ^{Ab}	29.73±1.50 ^{Bbc}	46.01±2.37 ^{Aa}	20.01±2.55 ^{Cb}	22.20±1.89 ^{Cb}	32.55±3.38 ^{Aa}	28.76±0.94 ^{Ca}
丙氨酸Ala	42.56±2.69 ^{Ac}	61.50±1.64 ^{Ab}	74.98±1.34 ^{Aa}	74.89±2.13 ^{Aa}	45.42±3.03 ^{Ab}	41.27±3.68 ^{Cb}	59.96±2.32 ^{AA}	45.82±2.38 ^{Bb}
脯氨酸Pro	3.32±0.34 ^{Ab}	2.68±0.28 ^{Cb}	3.89±0.25 ^{ABa}	3.15±0.27 ^{Bab}	2.35±0.21 ^{Bc}	5.02±0.10 ^{Aa}	4.11±0.11 ^{Ab}	4.10±0.40 ^{Ab}
缬氨酸Val*	5.12±0.04 ^{Bd}	7.00±0.06 ^{Bc}	12.18±0.19 ^{Aa}	8.51±0.67 ^{Ab}	6.74±0.59 ^{Ab}	4.06±0.05 ^{Cd}	8.45±0.05 ^{Ca}	5.03±0.09 ^{Bc}
蛋氨酸Met	2.50±0.11 ^{Bc}	3.51±0.11 ^{Ac}	4.86±0.10 ^{Aa}	4.62±0.11 ^{Ab}	2.57±0.02 ^{Bb}	1.89±0.01 ^{Bd}	3.29±0.10 ^{Ba}	2.29±0.03 ^{Bc}
异亮氨酸Ile*	5.54±0.01 ^{Bc}	7.79±0.06 ^{Bd}	12.75±0.17 ^{Aa}	9.70±0.05 ^{Ab}	7.52±0.05 ^{Ac}	4.17±0.02 ^{Ce}	9.19±0.04 ^{Ca}	5.53±0.09 ^{Cd}
亮氨酸Leu*	8.81±0.02 ^{Ce}	12.14±0.03 ^{Bd}	19.88±0.18 ^{Aa}	15.22±0.09 ^{Ab}	12.10±0.07 ^{Ac}	7.05±0.01 ^{Ce}	14.34±0.06 ^{Ca}	8.81±0.15 ^{Cd}
酪氨酸Tyr*	4.85±0.01 ^{Bc}	6.17±0.02 ^{Bd}	11.91±0.08 ^{Aa}	7.34±0.41 ^{Ac}	7.19±0.39 ^{Ac}	4.21±0.08 ^{Ce}	8.62±0.04 ^{Ca}	4.82±0.09 ^{BCd}
苯丙氨酸Phe*	3.84±0.01 ^{Cd}	5.81±0.02 ^{Bc}	9.29±0.14 ^{Aa}	7.06±0.18 ^{Ab}	5.44±0.17 ^{Ac}	2.84±0.03 ^{Ce}	6.71±0.05 ^{Ca}	3.75±0.07 ^{BCd}
组氨酸His	28.84±0.16 ^{Bc}	31.91±0.22 ^{Bc}	42.05±0.62 ^{Aa}	38.71±1.34 ^{Ab}	31.20±0.04 ^{Cab}	27.48±0.14 ^{Cc}	33.04±0.37 ^{Ba}	28.94±0.47 ^{Cbc}
赖氨酸Lys*	44.21±0.16 ^{Bd}	48.51±0.28 ^{Ac}	53.26±0.43 ^{Aa}	51.69±0.18 ^{Ab}	45.67±0.05 ^{Ab}	42.14±0.21 ^{Bd}	47.90±0.29 ^{Ca}	44.08±0.49 ^{Cc}
精氨酸Arg	6.00±0.04 ^{Bd}	6.42±0.02 ^{Bd}	11.38±0.22 ^{Aa}	9.15±0.51 ^{Ab}	8.72±0.15 ^{Aa}	7.64±0.31 ^{ABb}	8.56±0.37 ^{Ba}	6.23±0.39 ^{BCc}
胱氨酸Cys	0.21±0.01 ^{ABc}	0.35±0.05 ^{Bb}	0.35±0.05 ^{Bb}	0.31±0.07 ^{Bab}	0.21±0.01 ^{ABc}	0.34±0.04 ^{Bb}	0.20±0.03 ^{Cc}	0.11±0.02 ^{Bd}
UAA	19.10±3.21 ^{Bd}	24.04±0.28 ^{Bc}	44.97±1.17 ^{Aa}	34.77±0.51 ^{Ab}	25.03±0.62 ^{Ab}	16.49±1.15 ^{Ccd}	28.65±0.50 ^{Ca}	17.38±2.03 ^{Bc}
SAA	76.88±5.41 ^{Ad}	102.99±4.36 ^{Ac}	115.9±3.95 ^{Ab}	129.53±5.14 ^{Aa}	74.53±5.62 ^{Ab}	73.77±5.21 ^{Cb}	105.69±5.95 ^{Aa}	85.38±4.03 ^{Bb}
BAA	109.92±0.46 ^{Bd}	129.61±0.73 ^{Bc}	177.91±2.02 ^{Aa}	152.31±3.33 ^{Ab}	127.36±1.25 ^{Ab}	101.82±0.8 ^{Cd}	140.30±1.29 ^{Ca}	109.59±1.68 ^{Cc}
EAA	72.98±0.28 ^{Cd}	88.24±0.52 ^{Bc}	120.38±1.21 ^{Aa}	101.09±1.48 ^{Ab}	85.47±1.44 ^{Ac}	65.31±0.53 ^{Ce}	97.18±0.49 ^{Ca}	73.63±0.96 ^{Cd}
TFAA	205.90±9.54 ^{Bc}	256.64±5.23 ^{Bc}	338.78±7.28 ^{Aa}	316.61±8.85 ^{Ab}	226.92±8.19 ^{Ab}	192.08±7.62 ^{Cc}	274.64±7.53 ^{Ba}	212.35±7.91 ^{Bb}

注: *表示必需氨基酸, UAA 表示鲜味氨基酸(umami amino acids), SAA 表示甜味氨基酸(sweet amino acids), BAA 表示苦味氨基酸(bitter amino acids), EAA 表示必需氨基酸(essential amino acid), TFAA 表示总氨基酸(total free amino acids)。

渐降解, 而高温处理则又会加剧其反应速度^[39], 所以即使水分被大量蒸发会提高 ATP 的浓度, 但其浓度不会很高。AMP 和 IMP 是重要的鲜味核苷酸, 它们的含量对鱼肉的鲜味有着显著的影响。可以看出

AMP 在总体核苷酸中的占比极小, 几乎和 ATP 一样, 而 IMP 则占有着极大的比例, 表明在 ATP 降解过程中 AMP 大量生成的同时也在大量分解, 而 IMP 的分解速度要低于生成速度, 所以能够积累很

表 3 不同高温处理方式下草鱼肉呈味核苷酸含量(mg/100 g)

Table 3 Flavor nucleotides content of grass carp at different high temperature treatments (mg/100 g)

核苷酸	阈值	生鱼肉	电烤			
			5 min	10 min	15 min	20 min
ATP	—	5.09±0.29 ^{c,d,b}	10.47±1.57 ^{Ba}	7.43±0.29 ^{Cb}	7.75±0.42 ^{Cb}	7.13±0.42 ^{Cb}
ADP	—	3.96±0.16 ^{d,d,d}	8.09±0.80 ^{Bc}	9.59±0.37 ^{Cc}	22.64±1.43 ^{Cb}	47.54±1.51 ^{Ca}
AMP	50	7.95±0.65 ^{c,c,d}	5.33±0.69 ^{Bd}	9.42±0.70 ^{Bb}	8.55±0.43 ^{Bbc}	13.47±0.45 ^{Ba}
IMP	25	52.20±2.20 ^{d,e,d}	112.00±5.36 ^{Bc}	129.99±9.38 ^{Cb}	157.94±9.26 ^{Ca}	101.43±14.99 ^{Cc}
HxR	—	73.28±3.43 ^{b,d,b}	54.98±8.18 ^{Ca}	107.60±5.04 ^{Ba}	89.80±7.01 ^{Ca}	105.87±10.41 ^{Ba}
Hx	—	2.48±0.18 ^{c,e,d}	4.55±0.64 ^{Cd}	7.38±0.32 ^{Cc}	13.41±1.12 ^{Cb}	19.59±0.77 ^{Ca}
Total	—	144.96±6.91 ^{b,e,d}	195.42±17.24 ^{Cb}	271.41±16.10 ^{Ca}	300.09±19.67 ^{Ca}	295.03±28.55 ^{Ca}

核苷酸	空气油炸				过热蒸汽			
	5 min	10 min	15 min	20 min	5 min	10 min	15 min	20 min
ATP	13.50±2.49 ^{ABC}	19.18±1.90 ^{Ab}	27.02±1.77 ^{Aa}	30.75±3.52 ^{Aa}	16.12±2.30 ^{Aa}	15.86±0.80 ^{Ba}	16.92±1.36 ^{Ba}	16.91±0.84 ^{Ba}
ADP	8.85±0.69 ^{Bd}	54.03±3.18 ^{Ac}	135.18±13.89 ^{Ab}	186.19±4.61 ^{Aa}	28.90±1.09 ^{Ac}	27.76±0.56 ^{Bc}	46.50±1.46 ^{Bb}	56.77±1.56 ^{Ba}
AMP	11.53±0.58 ^{Ac}	8.83±0.43 ^{Bc}	33.02±8.67 ^{Aa}	22.74±0.50 ^{Ab}	6.45±0.86 ^{Bd}	13.54±0.60 ^{Ab}	18.80±0.73 ^{Ba}	11.40±0.64 ^{Cc}
IMP	268.46±11.22 ^{Ad}	350.93±12.89 ^{Ac}	419.93±8.61 ^{Ab}	445.10±7.98 ^{Aa}	150.05±12.87 ^{Bc}	172.29±11.86 ^{Bc}	289.98±11.10 ^{Ba}	214.66±7.84 ^{Bb}
HxR	131.57±12.74 ^{Ac}	131.28±9.93 ^{ABC}	213.27±11.02 ^{Ab}	297.90±8.51 ^{Aa}	85.81±7.82 ^{Bb}	151.88±19.68 ^{Aa}	148.67±5.54 ^{Ba}	80.72±9.06 ^{Cb}
Hx	7.65±1.07 ^{Bd}	30.47±0.97 ^{Bc}	52.64±1.16 ^{Ab}	67.93±1.33 ^{Aa}	31.01±0.49 ^{Ab}	36.82±0.62 ^{Aa}	19.79±0.79 ^{Bc}	36.90±1.72 ^{Ba}
Total	441.56±28.79 ^{Ad}	594.72±29.30 ^{Ac}	881.06±45.12 ^{Ab}	1050.61±26.45 ^{Aa}	318.34±25.43 ^{Bc}	418.15±34.12 ^{Bb}	540.66±20.98 ^{Ba}	417.36±21.66 ^{Bb}

多。三种处理方式下的 IMP 含量和总核苷酸含量的趋势一致, 空气油炸组的含量显著较高($P<0.05$), 在 20 min 时达到 445.10 mg/100 g, 过热蒸汽组和电烤组在 15 min 时达到最高含量, 分别为 289.98 和 157.94 mg/100 g, 进一步说明了空气油炸处理可以显著改善鱼肉的鲜味程度。HxR 和 Hx 会产生苦味并增加异味, 以 Hx 为主, 其含量通常用作评判水产品新鲜度的指标^[40], 三种处理方式虽然都显著提高了它们的含量($P<0.05$), 但由于 Hx 的含量并不高, 而 HxR 所产生的苦味效应并不是很大, 同时 AMP 也会起到风味增强的作用, 可以抑制苦味的产生, 所以 HxR 和 Hx 对鱼肉产生的不良影响很小。

2.9 TAV 分析

四种鲜味物质的 TAV 值如表 4 所示, 可以看出各处理组的 Asp 的 TAV 值差异不明显且都在 0.01 以内, AMP 的 TAV 值虽有些上升的趋势但也基本

都在 0.7 以内, 表明它们对鱼肉鲜味的贡献极小。而 Glu 的 TAV 值虽然前期都小于 1, 但电烤组在 10 min 时, 空气油炸组在 15 min 时, 其 TAV 值开始大于 1, 过热蒸汽组在 15 min 时的 TAV 值也达到 0.939, 表明 Glu 对鱼肉的鲜味存在一定的贡献。各组 IMP 的 TAV 值均大于 1, 表明 IMP 是鱼肉中主要的呈鲜物质, 空气油炸组的 TAV 值最大, 在 20 min 时达到 17.804, 其次是过热蒸汽组和电烤组, 它们在 15 min 时有着最高的 TAV 值, 分别为 11.599 和 6.318。由此可以得出空气油炸处理过的草鱼肉其鲜味程度最高, 滋味品质最好。需要注意的是三种方式在处理 15 min 后基本所有鲜味物质的 TAV 值都有所下降, 表明过长时间的高温环境会造成鲜味物质的流失, 因此需适当控制高温处理时间。

3 结论

与对照组的生鱼肉相比, 电烤、空气油炸、过热蒸汽三种高温处理方式均在不同程度上显著改变了草鱼肉的品质特性。通过 pH、持水性和色度值的分析结果, 可初步得出高温处理会极大地改变鱼肉的内部环境, 将大量的水分蒸出, 进而引发脂质和蛋白质发生变性和降解。TBA 值的结果表明了经空气油炸处理的草鱼肉其脂质氧化程度较高, 而蛋白羰基值的结果则反映了电烤和过热蒸汽处理会使得蛋白质氧化度较高。经高温处理后滋味物质的含量也显著增加, 游离氨基酸的分析结果显示空气油炸处理能使鱼肉中鲜味、甜味、苦味氨基酸均累积的最多(以 Glu、Gly、Ala、His、Lys 为主), 这得益于其较低的蛋白质氧化程度。呈味核苷酸的结果显示依旧是空气油炸组的总含量最高, 且其中发挥主要鲜味作用的 IMP 和 AMP 含量也是显著较高, 其次为过热蒸汽组和电烤组。TAV 的分析结果证明了经空气油炸

表 4 不同高温处理方式下鲜味物质的 TAV

Table 4 TAV of umami substances at different high temperature treatments

处理方式	时间(min)	Asp	Glu	AMP	IMP
生鱼肉	0	0.005	0.458	0.159	2.088
	5	0.004	0.741	0.107	4.480
电烤	10	0.010	1.234	0.188	5.200
	15	0.006	1.271	0.171	6.318
	20	0.004	0.515	0.269	4.057
	5	0.002	0.630	0.231	10.738
空气油炸	10	0.002	0.794	0.177	14.037
	15	0.004	1.486	0.660	16.797
	20	0.004	1.147	0.455	17.804
	5	0.004	0.822	0.129	6.002
过热蒸汽	10	0.002	0.542	0.271	6.892
	15	0.005	0.939	0.376	11.599
	20	0.006	0.561	0.228	8.586

处理的草鱼肉有着最高的鲜味程度,同时还揭示了三种方式的处理时间都不应该超过15 min,否则会造成鱼肉中鲜味物质的流失。综合来看空气油炸组的草鱼肉除了脂质氧化程度稍微偏高外,其蛋白氧化程度和滋味的表现均比较优异,表明该处理对草鱼肉食用品质的影响最佳。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] SUN X Y, GUO X B, JI M Y, et al. Preservative effects of fish gelatin coating enriched with CUR/βCD emulsion on grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during storage at 4 ℃[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 643–652.
- [2] ZHAN X M, SUN D W, ZHU Z W, et al. Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(17): 2925–2938.
- [3] HADJINIKOLOVA L, NIKOLOVA L, STOEVA A. Comparative investigations on the nutritive value of carp fish meat (*Cyprinidae*), grown at organic aquaculture conditions[J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2008, 14(2): 127–132.
- [4] 向雅芳, 熊光权, 乔宇, 等. 不同热处理方式对鲈鱼品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 127–135. [XIANG Y F, XIONG G Q, QIAO Y, et al. Effects of different heat treatments on the quality of largemouth bass[J]. *Food Science*, 2019, 40(21): 127–135.]
- [5] 夏超, 于小番, 崔丹丹, 等. 不同烹饪方式对黄颡鱼肉品质特性的影响[J]. *中国调味品*, 2020, 45(7): 96–100,107. [XIA C, YU X F, CUI D D, et al. Effects of different cooking methods on the quality characteristics of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *China Condiment*, 2020, 45(7): 96–100,107.]
- [6] LIU H, MA J, PAN T, et al. Effects of roasting by charcoal, electric, microwave and superheated steam methods on (non) volatile compounds in *Oyster cuts* of roasted lamb[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108324.
- [7] 张艳, 王圣开, 付勋, 等. 预制烤鱼水分分布及关键挥发性风味物质分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(2): 75–83. [ZHANG Y, WANG S K, FU X, et al. Analysis of moisture distribution and key volatile flavor compounds in prepared grilled fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(2): 75–83.]
- [8] 孙思远. 不同空气油炸条件对鲐鱼品质及安全性的影响研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022. [SUN S Y. Effects of different air frying conditions on quality and safety of mackerel[D]. Yantai: Yantai University, 2022.]
- [9] 丁怡萱, 周婷, 廖月琴, 等. 两种炸制方式对带鱼品质及风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(24): 244–253. [DING Y X, ZHOU T, LIAO Y Q, et al. Influence of two frying methods on the quality and flavor of hairtail were studied[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(24): 244–253.]
- [10] ALFY A, KIRAN B, JEEVITHA G C, et al. Recent developments in superheated steam processing of foods—a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(13): 2191–2208.
- [11] 叶藻, 谢晶, 邱伟强, 等. 常温与冷藏条件下不同阶段鸡肉呈味核苷酸及游离氨基酸含量的变化[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(24): 301–305. [YE Z, XIE J, QIU W Q, et al. Changes of flavor nucleotides and free amino acid contents in chicken muscle under room temperature and cold storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(24): 301–305.]
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.237-2016 食品安全国家标准 食品中 pH 值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.237-2016 National standard of food safety, determination of pH value in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
- [13] 张一鸣, 李思仪, 沈晓溪, 等. 加热方式对混合鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 64–69. [ZHANG Y M, LI S Y, SHEN X X, et al. Effect of heating method on the characteristics of mixed chyme gel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 64–69.]
- [14] 李红月, 王金厢, 李学鹏, 等. 竹荚鱼冻藏过程中肌肉品质与蛋白理化性质的变化及其相关性分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(12): 325–337. [LI H Y, WANG J X, LI X P, et al. Changes of *Trachurus japonicus* muscle quality and protein physico-chemical properties during frozen storage and correlation analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(12): 325–337.]
- [15] QIN R K, WU R L, SHI H N, et al. Formation of AGEs in fish cakes during air frying and other traditional heating methods[J]. *Food Chemistry*, 2022, 391: 133213.
- [16] AL-DALALI S, LI C, XU B C. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131881.
- [17] 张美, 蒋家乐, 朱清澄, 等. 不同杀菌处理对秋刀鱼软罐头营养及滋味的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 109–118. [ZHANG M, JIANG J L, ZHU Q C, et al. Effect of different sterilization treatments on the nutrition and taste of soft canned saury[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 109–118.]
- [18] ZHANG R J, QIU W Q, ZHANG M S, et al. Effects of different heating methods on the contents of nucleotides and related compounds in minced pacific white shrimp and Antarctic krill[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 142–150.
- [19] 王瑞睿. 过热蒸汽加工对猪肉品质影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. [WANG R R. Effects of superheated steam processing on pork meat quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.]
- [20] 周敏. 冷冻及烹调方式对脆肉鲩鱼肉品质的影响[D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2020. [ZHOU M. Effects of freezing and cooking treatment on quality of *Ctenopharyngodon idellus*[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University of Science and Technology, 2020.]
- [21] 范三红, 刘晓华, 胡雅楠, 等. 加热处理对鱼肉蛋白理化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(12): 104–107,112. [FAN S H, LIU X H, HU Y N, et al. Effect of heat treatment on protein in physical and chemical properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(12): 104–107,112.]
- [22] 王丽莎. 肌纤维类型组成对猪肉持水力的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [WANG L S. Effect of muscle fiber type composition on water-holding capacity of pork[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]
- [23] ZHANG M H, WANG D Y, XU X L, et al. Comparative proteomic analysis of proteins associated with water holding capacity in goose muscles[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 354–361.
- [24] CHELH L, GATELLIER P, SANTE-LHOUTELLIER V. Characterisation of fluorescent schiff bases formed during oxidation

- of pig myofibrils[J]. *Meat Science*, 2007, 76(2): 210–215.
- [25] HENRY Y, SEVE B, COLLEAUX Y, et al. Interactive effects of dietary levels of tryptophan and protein on voluntary feed intake and growth performance in pigs, in relation to plasma free amino acids and hypothalamic serotonin[J]. *Journal of Animal Science*, 1992, 70(6): 1873–1887.
- [26] 徐言, 陈季旺, 莫加利, 等. 烤制温度和时间对烧烤草鱼块品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(15): 36–43. [XU Y, CHEN J W, MO J L, et al. Effect of roasting temperature and time on the quality attributes of roasted grass carp fillets[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 36–43.]
- [27] GANHAO R, MORCUENDE D, ESTEVEZ M. Protein oxidation in emulsified cooked burger patties with added fruit extracts: Influence on colour and texture deterioration during chill storage[J]. *Meat Science*, 2010, 85(3): 402–409.
- [28] LI F F, ZHONG Q, KONG B H, et al. Deterioration in quality of quick-frozen pork patties induced by changes in protein structure and lipid and protein oxidation during frozen storage[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109142.
- [29] VENTANAS S, ESTEVEZ M, DELGADO C L, et al. Phospholipid oxidation, non-enzymatic browning development and volatile compounds generation in model systems containing liposomes from porcine *Longissimus dorsi* and selected amino acids[J]. *European Food Research and Technology*, 2007, 225: 665–675.
- [30] 李梦琪, 孙思远, 刘敏, 等. 加热温度和时间对真空低温烹饪鸡胸肉脂肪与蛋白质氧化的影响[J]. *肉类研究*, 2018, 32(10): 6–11. [LI M Q, SUN S Y, LIU M, et al. Effect of different temperature-time combinations on lipid and protein oxidation of sous-vide cooked chicken breast[J]. *Meat Research*, 2018, 32(10): 6–11.]
- [31] 刘奇. 鲢鱼腥味物质特征及其与脂肪酸氧化的关系研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. [LIU Q. Study on the off-flavor compounds character of sturgeon and their relationship with lipid oxidation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.]
- [32] 万红兵, 李海鹏, 雷元华, 等. 烹饪熟度对牛肉肌原纤维蛋白结构特性和氧化特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 17–25. [WAN H B, LI H P, LEI Y H, et al. Effect of degree of doneness on structural and oxidation properties of beef myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2021, 42(13): 17–25.]
- [33] ESTEVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: A review[J]. *Meat Science*, 2011, 89(3): 259–279.
- [34] HARIMANA Y, TANG X, LE G W, et al. Quality parameters of black carp (*Mylopharyngodon piceus*) raised in lotic and lentic freshwater systems[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 90: 45–52.
- [35] LI H J, HU Y F, ZHAO X H, et al. Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 137: 110403.
- [36] LIOE H N, APRIYANTONO A, TAKARA K, et al. Umami taste enhancement of MSG/NaCl mixtures by subthreshold L- α -aromatic amino acids[J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(7): S401–S405.
- [37] ZHAO C J, SCHIEBER A, GAENZLE M G. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations-A review[J]. *Food Research International*, 2016, 89: 39–47.
- [38] MOHAN C O, RAVISHANKAR C N, GOPAL T K S, et al. Nucleotide breakdown products of seer fish (*Scomberomorus commerson*) steaks stored in O₂ scavenger packs during chilled storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(2): 272–278.
- [39] LI Q, LI D P, QIN N, et al. Comparative studies of quality changes in white and dark muscles from common carp (*Cyprinus carpio*) during refrigerated (4 °C) storage[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2016, 51(5): 1130–1139.
- [40] FENG X, MOON S H, LEE H Y, et al. Effect of irradiation on the degradation of nucleotides in turkey meat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 73: 88–94.