

## 高压熬时间对猪头骨汤理化性质及风味品质的影响

张冬梅<sup>1</sup>, 石 淼<sup>1</sup>, 陈 苗<sup>2</sup>, 尹 涛<sup>1</sup>, 刘 茹<sup>1</sup>, 尤 娟<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 华中农业大学食品科学技术学院 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉) 武汉 430070

<sup>2</sup> 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室 武汉 430070)

**摘要** 为揭示高压熬煮过程中猪头骨汤营养物质迁移和风味特性的变化规律,以猪头骨为原料,测定高压熬煮 20,40,60,90,120 min 猪头骨汤的营养组成、颗粒特性及风味成分,并利用电子舌、电子鼻进行感官评价。结果表明:固形物、可溶性蛋白、总糖及矿物质等含量在熬煮过程中总体呈上升趋势。熬煮 60 min 时,骨汤具有较高的白度与亮度。骨汤粒径  $D[3,2]$  与  $D[4,3]$  在熬煮 90 min 时达到最小值,之后略有增大,而电位绝对值不断降低并在熬煮 60 min 后趋于稳定。微观结构显示熬煮过程中颗粒不断增多,在熬煮 120 min 时出现部分聚集的颗粒。20~90 min 熬煮过程中,多数脂肪酸含量及谷氨酸、天冬氨酸含量不断提高,之后有所降低,其它氨基酸含量均增加。5'-AMP 含量先减小后增加,5'-IMP、5'-GMP、5'-CMP 含量均先增加后减小,分别在 40,60,40 min 时达到最大值。电子鼻和电子舌数据表明,不同高压熬煮时间的猪头骨汤气味和滋味有较大差异,熬煮 60 min 和 90 min 的猪头骨汤气味特性较好,腥味较轻,其中熬煮 60 min 的猪头骨汤鲜味响应值最高。醛类、醇类及烯炔类是猪头骨汤中主要挥发性风味物质,不同熬煮时间样品挥发性风味物质种类及相对含量有所差异。综合分析认为,高压熬煮 60 min 是制作猪头骨汤的最佳熬煮时间,此时营养物质含量较高,体系较稳定,风味较好。

**关键词** 猪头骨; 风味; 熬煮时间; 营养

**文章编号** 1009-7848(2024)10-0292-17 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.027

我国汤产品工业化生产相对落后,近年随着以动物骨为对象的科研的深入,开发出多种骨源产品,如高汤和鲜味肽等被广泛应用在火锅、麻辣烫、方便面的汤料中,可见骨源产品市场前景广。猪头骨作为猪骨副产物之一,其产量达到总猪骨产量的 20%,由于骨质坚硬,脂肪含量高,异味重等问题,难以充分利用,造成严重的资源浪费和环境污染。而工业预制猪头骨汤的开发,既可以满足人们对方便快捷的向往,也符合人们的饮食习惯。目前关于骨汤的研究重点集中在加工工艺以及营养风味上,致力于生产出健康美味、方便快捷的汤产品。骨汤在制作中,蛋白质、脂质、糖类、矿物质、呈味核苷酸、氨基酸、小肽以及挥发性化合物被释放出来<sup>[1]</sup>,同时加上香精调料的辅助,形成汤独特的风味。目前人们越来越追求原汁原味,绿色健康的饮食观念,有必要探究在工业化生产时,不添加较多调料的骨汤品质的变化规律。

熬煮方式与时间是汤类生产的重要参数。有研究表明熬煮时间越长其营养成分释放越多,风

味成分渐趋稳定<sup>[2]</sup>。对工业生产而言,熬煮时间不宜过长,一般控制在 2 h 内。高压熬煮是工业化生产的主要加工方式,在高压热环境中,与常压相比,汤中的热反应速率升高,营养成分释放与风味形成速率加快<sup>[3]</sup>。目前未见以猪头骨这种猪骨副产物为原料制作的汤类产品。本研究从工业化生产的角度出发,在添加较少调味料条件下,研究不同高压熬煮时间对猪头骨汤的可溶性蛋白、总糖、矿物质、脂肪酸组成、5'-核苷酸及挥发性化合物的差异,并利用电子舌、电子鼻进行感官评价,同时对猪骨汤微观结构及粒径进行表征,揭示熬煮时间对猪头骨汤物质迁移规律和风味特性的影响,为猪骨副产物的高值化利用以及工业化生产高品质猪头骨汤提供一定的理论参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料与试剂

冷冻猪头骨,华中农业大学菜市场;5'-核苷酸、氨基酸、脂肪酸标准品均为色谱纯级,上海源叶生物科技有限公司;乙醚、石油醚、磷酸二氢钠、磷酸、酒石酸钾钠、福林酚、氢氧化钠、盐酸均为分析纯级,国药集团化学试剂有限公司;牛血清蛋白

收稿日期: 2023-10-13

第一作者: 张冬梅,女,硕士

通信作者: 尤娟 E-mail: juanyou@mail.hzau.edu.cn

(分析纯级),德国 BioFroxx-赛国生物科技有限公司;甲醇、乙腈、正己烷、三氟化硼甲醇、异硫氰酸苯酯( $\geq 98\%$ )均为色谱纯级,德国 CNW Technologies GmbH。

## 1.2 仪器与设备

ZM-100 反压高温蒸煮消毒锅,广州标际包装设备有限公司;UV2600A 型紫外分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司;UltraScan VIS 型色差仪,美国 HunterLab 公司;FOX4000 型电子鼻、Astree II 型电子舌,法国 Alpha M.O.S 公司;Agilent1260 型液相色谱仪,上海 Agilent 公司;

Trace1310 ISQ 型气相色谱质谱仪,上海 Thermo Fisher 公司;iCAP7200 型电感耦合等离子体发射光谱仪,德国赛默飞公司;ACQUITY UPLC 超高效液相色谱系统,美国 Waters;MS2000 型激光粒度仪、Zetasizer Nano ZS 纳米粒度及电位分析仪,英国马尔文(Malvern)仪器。

## 1.3 试验方法

1.3.1 猪头骨汤熬制 猪头骨清汤制作流程如图1所示,熬煮时间分别设置为20,40,60,90,120 min,制备不同高压熬煮时间的猪头骨汤。



图1 猪头骨清汤制作流程

Fig.1 The process of making pork head bone broth

1.3.2 固形物含量、可溶性蛋白含量、总糖含量的测定 固形物含量参考 He 等<sup>[4]</sup>的方法测定,称 20 mL 样本于称量瓶中,并记录总质量。在 105 °C 烤箱中烘干,直至达到恒重;可溶性蛋白含量用 Lowry 法测定;总糖含量采用索莱宝试剂盒测定,检测方法按照说明书所述。

1.3.3 灰分及矿物质含量的测定 猪头骨汤灰分含量参照《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(GB 5009.4-2016),采用高温灼烧法进行测定。矿物质测定参考《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268-2016),对猪头骨汤微波消解后,用电感耦合等离子体发射光谱仪进行矿物质测定。

1.3.4 脂肪酸组成测定 参考 Ren 等<sup>[5]</sup>的方法,稍作修改。将适量猪头骨汤样品与 2 mL 95%乙醇,10 mL 8.3 mol/L 盐酸溶液混匀,在 80 °C 水浴中水解 40 min。水解完成后加入 10 mL 95%乙醇,用 100 mL 乙醚-石油醚混合液分 3 次提取,合并提取液后,将石油醚-乙醚层蒸干。将提取的脂肪进行皂化和甲酯化,得到处理后的样品,取其上层清液,用 0.45 μm 滤膜过滤后进行气相色谱检测。

1.3.5 色度测定 将猪头骨汤置于 1 cm 比色皿

中。使用色差仪测定室温下猪头骨汤的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,样品平行测定 6 次,取平均值。 $L^*$  为样品的亮度值; $a^*$  为样品的红绿值; $b^*$  为样品的黄蓝值。白度  $W$  的计算可参考公式(1):

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

1.3.6 粒径与电位测定 参考 Guan 等<sup>[2]</sup>的方法,使用 Zeta 电位分析仪和马尔文激光粒度仪分别在室温下分析猪头骨汤的  $\zeta$ -电位和微纳米粒度分布。

1.3.7 微观结构观察 采用倒置光学显微镜在室温下观察猪头骨汤的光学显微图像。将汤样品滴在载玻片上,盖上盖玻片进行观察。

1.3.8 电子鼻与电子舌检测 电子鼻检测参考 Zou 等<sup>[6]</sup>方法,稍作改动。称取猪头骨汤 3 g 于 10 mL 的进样瓶中,待测。设置运行参数:顶空温度 50 °C,产生时间 120 s,振荡速度 500 r/min,进样针温度 60 °C,清洗时间 120 s,总产生时间 120 s,获取间隔时间 1 s,获取延滞时间 300 s,载气为干燥空气,流速 150 mL/min,每个样品测 4 次。

电子舌检测参考任佳伟等<sup>[7]</sup>方法,稍作改动。将猪头骨汤在 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液 80 mL 于 100 mL 烧杯中,待测。设置运行参数:采

集时间 120 s, 获取时间间隔 1 s, 测试温度为室温。每个样品测 7 次。

**1.3.9 氨基酸组成测定** 参考刘振艳等<sup>[8]</sup>的方法, 稍作修改, 取适量猪头骨汤于水解管中, 加入 6 mol/L HCL, 在 110 ℃水解 22 h 后, 冷却, 定容至 25 mL, 取 100  $\mu$ L 于 15 mL 离心管, 放入 60 ℃真空干燥箱中, 将溶剂烘干后, 向离心管中充氮, 加入 50  $\mu$ L 衍生试剂(乙醇:异硫氰酸苯酯:水:三乙胺=7:1:1:1), 常温下衍生 30 min, 加入流动相 A 定容到 0.5 mL, 混匀, 过 0.45  $\mu$ m 有机膜上机。仪器参数:色谱柱 C18 SHISEIDO (4.6 mm $\times$ 250 mm $\times$ 5  $\mu$ m); 进样量 10  $\mu$ L; 柱温 40 ℃; 波长 254 nm; 流动相 A:0.1 mol/L 无水乙酸钠:乙腈=97:3, 混匀后调 pH 值至 6.5; 流动相 B:乙腈:水=80:20。

**1.3.10 核苷酸检测** 参考 Zhu 等<sup>[9]</sup>的方法, 量取 5 mL 猪头骨汤样品加入 20 mL 高氯酸溶液 (5%) 后进行均质, 在 4 ℃条件下 1 000 r/min 离心 10 min, 然后用 NaOH 溶液将上清液 pH 值调至 5.6 左右, 用蒸馏水定容至 30 mL, 过 0.22  $\mu$ m 水滤膜后, 上机测试。

**1.3.11 挥发性风味物质的测定** 参考曾文浩等<sup>[10]</sup>方法, 取 5 mL 猪头骨汤加入样品瓶中, 加入 0.8 g 氯化钠, 使用固相微萃取纤维提取不同熬煮时间猪头骨汤中的风味化合物。加入 1  $\mu$ L 内标环己酮 (1 000  $\mu$ g/kg)。将挥发性化合物的质谱与美国国家标准与技术研究所 NIST 数据库中的质谱进行比较, 并将保留时间与文献报道的保留时间进行匹配, 以鉴定挥发性化合物。采用峰面积归一化法分析挥发性成分的相对含量。

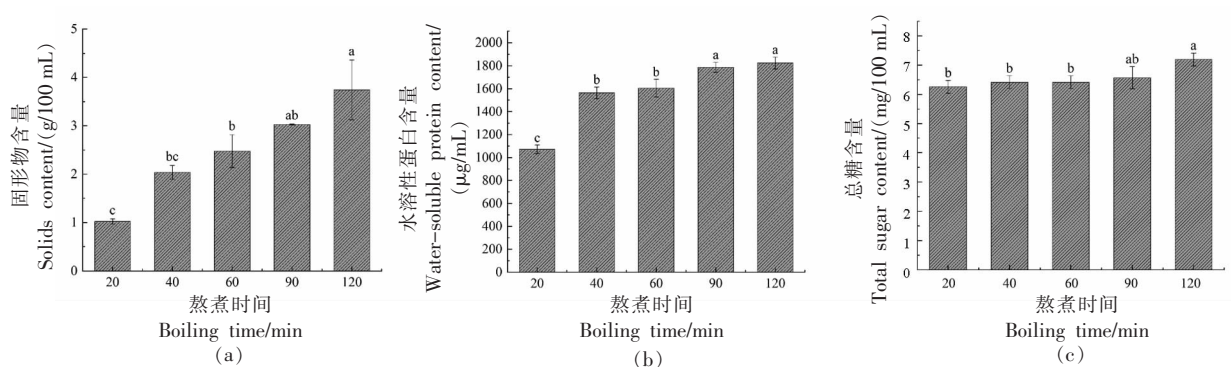
## 1.4 数据分析

每组试验数据若无特别说明, 均平行测定 3 次并进行方差分析, 所得数据采用 Origin 9.0 与 SPSS 19.0 进行数据处理与统计。

## 2 结果与分析

### 2.1 固形物、可溶性蛋白质、总糖含量的变化

蛋白质、总糖等是汤中重要的营养物质, 同时赋予汤风味与口感, 可溶性固形物也是反映汤整体营养与风味物质溶出的重要指标。汤的固形物含量主要是蛋白质、糖类、矿物质、氨基酸等成分<sup>[11]</sup>, 熬煮初期主要是骨粒表面的可溶性物质溶出, 随着熬煮时间延长, 骨粒在高压热环境下, 结构变得软而松散, 内部物质更易溶出, 汤体系中的化学反应加剧, 同时一些不溶性大分子开始溶出<sup>[12]</sup>, 猪头骨汤固形物含量在高压熬煮过程中含量不断增加。水溶性蛋白含量在高压熬煮过程中整体呈增加趋势, 之后趋于稳定。Guan 等<sup>[2]</sup>、Lin 等<sup>[13]</sup>的研究表明, 180 min 内熬煮过程中鸡汤、鱼汤中可溶性蛋白含量均不断增加。而本研究中蛋白含量增加缓慢, 一方面可能是头骨较为坚硬, 结构不易破坏, 导致蛋白溶出较慢, 另一方面可能是在高压热环境下, 蛋白溶出过程中同时也降解成小分子肽和游离氨基酸, 蛋白质和糖类的美拉德反应会消耗蛋白质<sup>[14]</sup>。总糖含量在熬煮前 60 min 无显著差异, 之后缓慢增加, 与蛋白含量增加趋势类似, 可能是由于长时间的熬煮, 猪头骨颗粒结构变的更加松散, 蛋白与糖类更易溶出, 且溶出量大于消耗量, 导致其含量有所增加<sup>[15]</sup>。



注:不同小写字母表示组间具有显著性差异, $P<0.05$ ,下同。

图2 猪头骨汤熬煮过程中固形物含量(a)、水溶性蛋白含量(b)、总糖含量(c)变化

Fig.2 Changes in solids (a), water-soluble protein (b), total sugar (c) during the boiling process of pork skull soup



2.2 灰分及矿物质含量的变化

矿物质在人体生理代谢中十分重要，猪头骨汤的灰分及钠、钾、钙、镁含量整体上呈上升趋势。由图 3 可知，灰分含量由 39 mg/100 g 增加到 82 mg/100 g，钠含量由 193.1 mg/L 增加到 332.5 mg/L，钙含量由 128.8 mg/L 增加到 235.3 mg/L，镁含量由 44 mg/L 增加到 71 mg/L，钾含量由 57 mg/L 增加到 126 mg/L。钠、钙、镁含量分别在熬煮 120，60,90 min 时有轻微下降，可能是由于金属离子也会与溶出的蛋白、糖类等物质结合形成大聚体被

沉淀,并在过滤阶段去除<sup>[1]</sup>,当矿物质溶出速率低于共聚物沉降速率时,矿物质含量便会降低。Zou 等<sup>[6]</sup>在料液比 1:3,熬煮时间 120 min 的常压条件下烹制排骨汤和鸡汤，得到汤的钙含量最高为 15.76 mg/L 和 15.88 mg/L,低于本研究中高压熬煮的猪头骨汤，推测一方面是由于骨粒中的营养物质在高压下比在常压更易与水进行物质交换,另一方面是由于猪头骨原料的粒度较小（1~2 cm），与水接触面积更大,物质交换更频繁<sup>[3]</sup>。

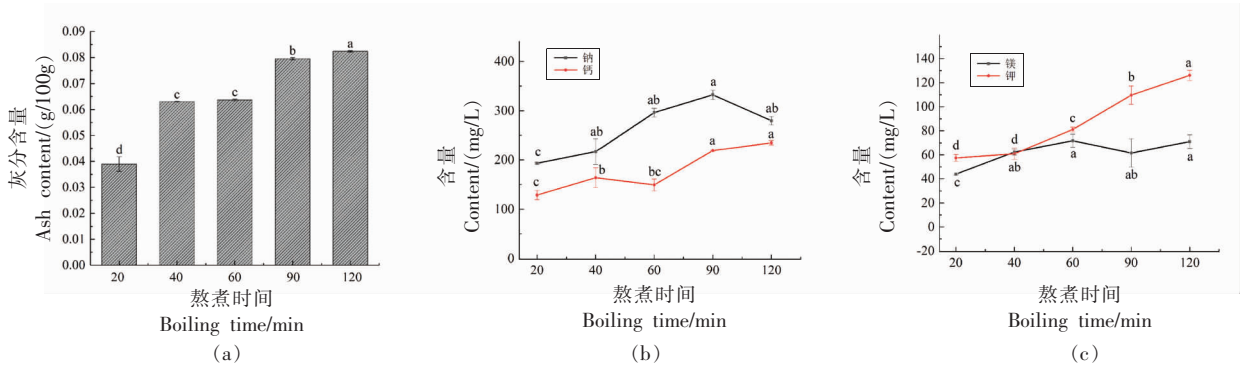


图 3 猪头骨汤熬煮过程中灰分(a)、钠和钙(b)、镁和钾(c)含量变化  
Fig.3 Changes in ash (a), sodium and calcium (b) and magnesium and potassium (c) contents during boiling of pork head bone broth

2.3 色泽的变化

汤的色泽与消费者体验感密切相关，由表 1 可知， $L^*$  值与白度先升高后降低，在 60 min 时达到最大， $b^*$  值也是先升高后降低，在 90 min 时达到最大， $a^*$  值在熬煮过程中不断升高，在 90 min 后趋于稳定。高压熬煮时间为 60 min 时，具有较高的白度与亮度,从外观上看也较易被人接受。颜

色特性呈现此趋势可能是由于在高压热环境下，猪头骨汤中蛋白、脂质等成分溶出,乳化作用产生的小颗粒使汤体系光散射发生改变，从而变白<sup>[9]</sup>，后期下降可能是因为体系溶出的物质间发生美拉德反应,使颜色变得暗淡而浑浊<sup>[14]</sup>，也可能是由于物质溶出增多,导致汤体系对光的散射、反射及透射发生改变。

表 1 猪头骨汤熬煮过程中色泽变化  
Table 1 Changes in coloration of pork head bone soup during boiling

样品	$L^*$	$a^*$	$b^*$	白度
20 min	$45.72 \pm 0.091^c$	$0.31 \pm 0.164^c$	$5.53 \pm 0.192^d$	$45.44 \pm 0.10^b$
40 min	$46.40 \pm 0.125^b$	$0.20 \pm 0.12^{bc}$	$6.31 \pm 0.176^c$	$46.03 \pm 0.117^a$
60 min	$46.83 \pm 0.051^a$	$0.37 \pm 0.149^b$	$7.13 \pm 0.129^b$	$46.35 \pm 0.047^a$
90 min	$45.42 \pm 0.059^d$	$0.53 \pm 0.143^a$	$7.78 \pm 0.252^a$	$44.66 \pm 0.66^c$
120 min	$42.94 \pm 0.043^c$	$0.65 \pm 0.12^a$	$6.90 \pm 0.11^b$	$42.53 \pm 0.050^c$

注:每列不同小写字母表示组间具有显著性差异, $P<0.05$ 。

2.4 粒径与电位的变化

由图 4a 可知,  $D[3,2]$ 、 $D[4,3]$  值随熬煮时间延长而减小, 在熬煮 90 min 时达到最小值, 之后略有增大。图 4b 表明不同高压熬煮时间猪头骨汤颗粒粒径差异明显, 与熬煮 20、40、120 min 相比, 熬煮 60 min 和 90 min 的汤中大粒径颗粒较少, 小粒径颗粒较多。这种现象一是由于溶出的大分子及大分子物质形成的聚集体在连续高压、高温下降

解, 导致粒径减小, 如胶原蛋白在长时高温下, 会降解成小分子的蛋白质<sup>[16]</sup>; 二是由于汤体系的沸腾使溶出的蛋白和脂质发生乳化作用, 形成粒径较小的颗粒<sup>[6,17]</sup>, 根据 DLVO 理论和 Stokes 定律, 颗粒的粒径越小, 越有利于体系的稳定性。然而高压熬煮时间过长可能会使汤体系美拉德反应和脂质氧化等反应加剧<sup>[14]</sup>, 分子间通过共价键、疏水相互作用甚至离子键等聚集, 导致颗粒粒径增大。

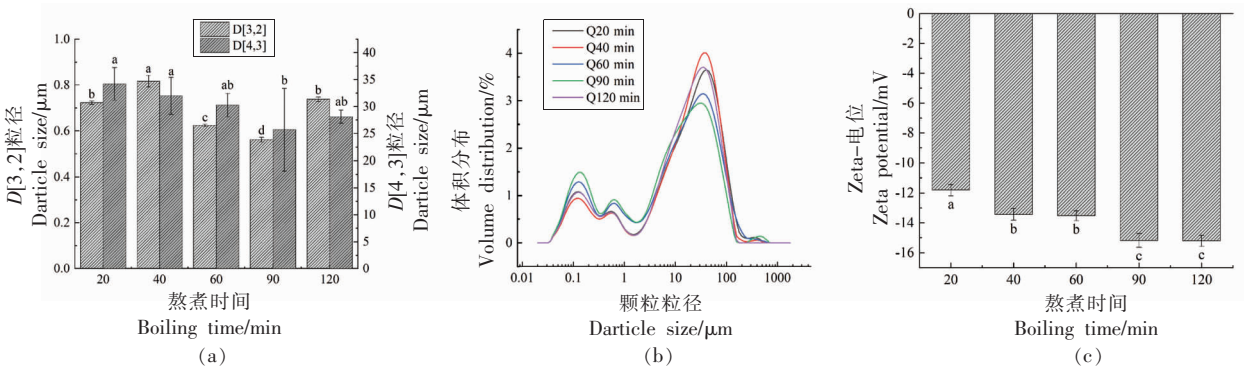


图 4 猪头骨汤熬煮过程中粒径(a,b)及电位(c)变化

Fig.4 Changes in particle size (a, b) and potential (c) during boiling of pork head bone broth

$\zeta$ -电位可反映蛋白质带电情况和空间位阻情况, 在一定程度上反映体系稳定性, 其绝对值在 25~30 时体系较稳定, 绝对值越高, 颗粒间的静电斥力越大。高压熬煮时间对猪头骨汤  $\zeta$ -电位的影响如图 5c 所示, 熬煮 20~120 min 的过程中,  $\zeta$ -电位的绝对值不断增大, 在熬煮 60 min 时达到 25, 说明熬煮时间大于 60 min 的汤体系相对稳定, 这与体系中粒径的变化是一致的; 在熬煮 90 min 后电位趋于稳定, 这可能是由于长时间的高压热环

境导致蛋白质过度变性, 降低了其在油水界面的吸附能力, 使颗粒间空间位阻降低<sup>[18]</sup>, 同时蛋白质等还在缓慢溶出, 静电斥力不断增强, 二者共同作用达到一个相对平衡的状态。Guan 等<sup>[2]</sup>和 Qi 等<sup>[18]</sup>对鸡汤的研究也得出了类似的结论。

2.5 微观结构

利用倒置光学显微镜对猪头骨汤的微观形态进行观察, 如图 5 所示, 在高压熬煮 20~40 min 过程中, 图中已有较小的圆形颗粒和不规则的聚集

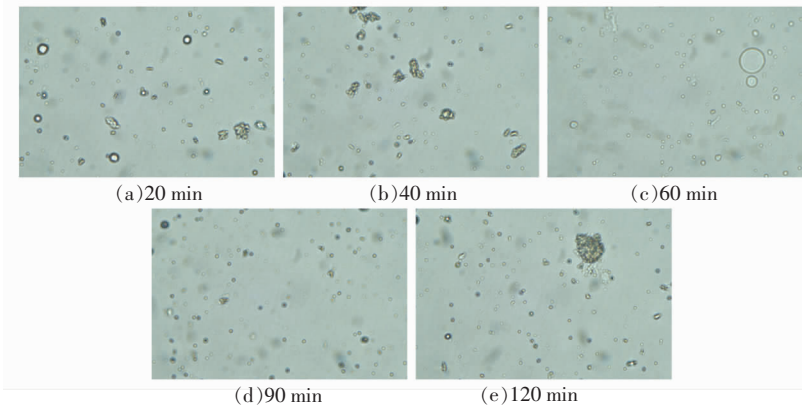


图 5 猪头骨汤熬煮过程微观结构变化

Fig.5 Microstructural changes during boiling of pork head bone broth

体形成,说明该阶段骨粒中营养物质不断溶出,并通过分子间相互作用而聚集,同时发生轻微的乳化作用。在 60~90 min 熬煮阶段,圆形颗粒增多,聚集体减少。在熬煮 120 min 后,乳化的圆形颗粒继续增多,同时体系中部分颗粒聚集,这与粒径体积分布图的结果一致。Lin 等<sup>[13]</sup>和 Fan 等<sup>[19]</sup>对鱼汤微观结构进行观察,同样得出经过长时间的熬煮,汤体系中产生的颗粒会发生自聚集现象的结果。

2.6 脂肪酸组成

脂肪酸是人体必需营养物质,也是风味物质的重要前体,不同高压熬煮时间的猪头骨汤脂肪酸含量如表 2 所示。共鉴定到 24 种脂肪酸,其中 10 种饱和脂肪酸,5 种单不饱和脂肪酸,9 种多不饱和脂肪酸,饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸分别占

总脂肪酸含量的 43%和 57%左右。高压熬煮过程中油酸含量始终最高,在高压熬煮 90 min 时,达到了 15.96 mg/100 mL。油酸在调节血脂水平,降低胆固醇,预防心血管疾病上具有一定的效果<sup>[20]</sup>。在 20~90 min 的高压熬煮过程中,多数脂肪酸从骨粒中不断迁移到汤中,含量不断提高,在熬煮 120 min 时其含量有所降低,可能此时脂肪酸溶出达到平衡,同时脂肪酸降解产生醛、酮、醇等挥发性物质<sup>[21]</sup>,不饱和脂肪酸含量降低,也可能因为高压、高温下双键被氧化而断裂,Guan 等<sup>[12]</sup>与 Lin 等<sup>[13]</sup>对汤的研究中也有类似的现象。另外,猪头骨汤中  $\Sigma$ PUFA $\omega$ 6/ $\Sigma$ PUFA $\omega$ 3 为 6~7,WHO 建议该比值在 5~10,符合 WHO 的推荐值<sup>[22]</sup>。

表 2 猪头骨汤熬煮过程中脂肪酸含量变化  
Table 2 Changes in fatty acid content during boiling of pork skull soup

脂肪酸名称		脂肪酸含量/(mg/100 mL)				
		20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
C12:0	月桂酸	0.1155 ± 0.0001 <sup>c</sup>	0.1162 ± 0.0002 <sup>cd</sup>	0.1170 ± 0.0002 <sup>b</sup>	0.1185 ± 0.0003 <sup>a</sup>	0.1166 ± 0.0003 <sup>bc</sup>
C14:0	肉豆蔻酸	0.3007 ± 0.0031 <sup>c</sup>	0.3232 ± 0.0040 <sup>b</sup>	0.3240 ± 0.0021 <sup>b</sup>	0.3816 ± 0.0097 <sup>a</sup>	0.3380 ± 0.0038 <sup>b</sup>
C15:0	十五碳酸	0.0743 ± 0.0004 <sup>b</sup>	0.0738 ± 0.0005 <sup>b</sup>	0.0740 ± 0.0004 <sup>b</sup>	0.0781 ± 0.0011 <sup>a</sup>	0.0767 ± 0.0002 <sup>a</sup>
C16:0	棕榈酸	6.5322 ± 0.1407 <sup>c</sup>	7.4054 ± 0.2026 <sup>b</sup>	7.5875 ± 0.0894 <sup>b</sup>	9.4866 ± 0.2780 <sup>a</sup>	7.9150 ± 0.1665 <sup>b</sup>
C16:1	棕榈油酸	0.4168 ± 0.0084 <sup>d</sup>	0.4537 ± 0.0088 <sup>c</sup>	0.4580 ± 0.0029 <sup>c</sup>	0.5637 ± 0.0184 <sup>a</sup>	0.5094 ± 0.0044 <sup>b</sup>
C17:0	十七碳酸	0.1466 ± 0.0015 <sup>b</sup>	0.1485 ± 0.0022 <sup>b</sup>	0.1521 ± 0.0018 <sup>b</sup>	0.1755 ± 0.0049 <sup>a</sup>	0.1475 ± 0.0010 <sup>b</sup>
C18:0	硬脂酸	4.4180 ± 0.0298 <sup>d</sup>	4.8150 ± 0.1243 <sup>c</sup>	4.9236 ± 0.0577 <sup>c</sup>	6.3462 ± 0.1041 <sup>a</sup>	5.2659 ± 0.1087 <sup>b</sup>
C18:1n9c	油酸	11.0439 ± 0.3123 <sup>c</sup>	12.5253 ± 0.2750 <sup>b</sup>	12.6778 ± 0.0645 <sup>b</sup>	15.9577 ± 0.4504 <sup>a</sup>	13.134 ± 0.2346 <sup>b</sup>
C18:2n6c	亚油酸	2.8749 ± 0.0825 <sup>c</sup>	3.3995 ± 0.1056 <sup>b</sup>	3.3528 ± 0.0254 <sup>b</sup>	4.1965 ± 0.0917 <sup>a</sup>	3.2977 ± 0.0843 <sup>b</sup>
C20:0	花生酸	0.2951 ± 0.0035 <sup>bc</sup>	0.2934 ± 0.0016 <sup>c</sup>	0.2964 ± 0.0007 <sup>bc</sup>	0.3159 ± 0.0034 <sup>a</sup>	0.3045 ± 0.0032 <sup>b</sup>
C18:3n3	α-亚油酸	0.1896 ± 0.0025 <sup>d</sup>	0.2131 ± 0.0007 <sup>b</sup>	0.2059 ± 0.0051 <sup>bc</sup>	0.2321 ± 0.0006 <sup>a</sup>	0.2008 ± 0.0031 <sup>c</sup>
C20:1	花生烯酸	0.4454 ± 0.0058 <sup>c</sup>	0.4869 ± 0.0048 <sup>b</sup>	0.4943 ± 0.0034 <sup>b</sup>	0.6086 ± 0.0162 <sup>a</sup>	0.5101 ± 0.0054 <sup>b</sup>
C20:2	二十碳二烯酸	0.2957 ± 0.0041 <sup>c</sup>	0.3225 ± 0.0044 <sup>b</sup>	0.3321 ± 0.0052 <sup>b</sup>	0.3760 ± 0.0114 <sup>a</sup>	0.3226 ± 0.0060 <sup>b</sup>
C22:0	二十二碳酸	0.2738 ± 0.0002 <sup>a</sup>	0.2735 ± 0.0002 <sup>a</sup>	0.2727 ± 0.0016 <sup>a</sup>	0.2762 ± 0.0013 <sup>a</sup>	0.2752 ± 0.0002 <sup>a</sup>
C20:3n6	顺-8,11,14-二十碳三烯酸	0.1628 ± 0.0008 <sup>b</sup>	0.1614 ± 0.0019 <sup>b</sup>	0.1636 ± 0.0024 <sup>b</sup>	0.1759 ± 0.0019 <sup>a</sup>	0.1722 ± 0.0001 <sup>a</sup>
C20:3n3	顺-11,14,17-二十碳三烯酸	0.1577 ± 0.0004 <sup>c</sup>	0.1602 ± 0.0004 <sup>b</sup>	0.1559 ± 0.0001 <sup>c</sup>	0.1635 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.1621 ± 0.0010 <sup>a</sup>
C22:1n9	芥酸	0.2183 ± 0.0006 <sup>a</sup>	0.2275 ± 0.0045 <sup>a</sup>	0.2039 ± 0.0032 <sup>b</sup>	0.2207 ± 0.0041 <sup>a</sup>	0.2169 ± 0.0023 <sup>a</sup>
C20:4n6	花生四烯酸	0.2703 ± 0.0014 <sup>b</sup>	0.2618 ± 0.0002 <sup>c</sup>	0.2675 ± 0.0004 <sup>bc</sup>	0.3090 ± 0.0045 <sup>a</sup>	0.3083 ± 0.0014 <sup>a</sup>
C23:0	二十三酸	0.1555 ± 0.0001 <sup>b</sup>	0.1554 ± 0.0003 <sup>b</sup>	0.1554 ± 0.0003 <sup>b</sup>	0.1587 ± 0.0006 <sup>a</sup>	0.1586 ± 0.0002 <sup>a</sup>
C22:2	顺-13,16-二十二碳二烯酸	0.1324 ± 0.0010 <sup>a</sup>	0.1291 ± 0.0001 <sup>ab</sup>	0.1266 ± 0.0017 <sup>d</sup>	0.1297 ± 0.0002 <sup>ab</sup>	0.1288 ± 0.0007 <sup>c</sup>
C20:5n3	二十碳五烯酸 EPA	0.0751 ± 0.0007 <sup>a</sup>	0.0733 ± 0.0010 <sup>a</sup>	0.0730 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.0732 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.0749 ± 0.0001 <sup>a</sup>

(续表 2)

脂肪酸名称		脂肪酸含量/(mg/100 mL)				
		20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
C24:0	二十四酸	0.4256 ± 0.0010 <sup>c</sup>	0.4135 ± 0.0018 <sup>d</sup>	0.4284 ± 0.0005 <sup>c</sup>	0.4450 ± 0.0055 <sup>b</sup>	0.4754 ± 0.0030 <sup>a</sup>
C24:1	二十四烯酸	0.2081 ± 0.0017 <sup>c</sup>	0.2080 ± 0.0013 <sup>c</sup>	0.2135 ± 0.0006 <sup>c</sup>	0.2309 ± 0.0037 <sup>b</sup>	0.2530 ± 0.0030 <sup>a</sup>
C22:6n3	二十二碳六烯酸 甲 DHA	0.0930 ± 0.0000 <sup>b</sup>	0.0932 ± 0.0004 <sup>b</sup>	0.0895 ± 0.0003 <sup>c</sup>	0.0971 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.0875 ± 0.0006 <sup>d</sup>
ΣFA	总脂肪酸	29.3214 ± 0.6022 <sup>c</sup>	32.7335 ± 0.7414 <sup>b</sup>	33.1457 ± 0.2600 <sup>b</sup>	41.1168 ± 1.0111 <sup>a</sup>	34.4523 ± 0.6319 <sup>b</sup>
ΣSFA	总饱和脂肪酸	12.7374 ± 0.1800 <sup>d</sup>	14.0179 ± 0.3369 <sup>c</sup>	14.3311 ± 0.1501 <sup>bc</sup>	17.7822 ± 0.4083 <sup>a</sup>	15.0735 ± 0.2864 <sup>b</sup>
ΣUFA	总不饱和脂肪酸	16.5840 ± 0.4222 <sup>c</sup>	18.7155 ± 0.4045 <sup>b</sup>	18.8145 ± 0.1099 <sup>b</sup>	23.3346 ± 0.6028 <sup>a</sup>	19.3788 ± 0.3455 <sup>b</sup>
ΣPUFAω3	总 ω3 多不饱和 脂肪酸	0.5154 ± 0.0036 <sup>c</sup>	0.5397 ± 0.0017 <sup>b</sup>	0.5244 ± 0.0043 <sup>c</sup>	0.5659 ± 0.0006 <sup>c</sup>	0.5253 ± 0.0034 <sup>c</sup>
ΣPUFAω6	总 ω6 多不饱和 脂肪酸	3.3080 ± 0.0847 <sup>c</sup>	3.8228 ± 0.1040 <sup>b</sup>	3.7839 ± 0.0275 <sup>b</sup>	4.6814 ± 0.0981 <sup>a</sup>	3.7782 ± 0.0856 <sup>b</sup>
ΣPUFAω6 /ΣPUFAω3	总 ω3 多不饱和 脂肪酸/总 ω6 多 不饱和脂肪酸	6.4172 ± 0.1193 <sup>c</sup>	7.0826 ± 0.1705 <sup>b</sup>	7.2158 ± 0.0068 <sup>b</sup>	8.2724 ± 0.1647 <sup>a</sup>	7.1918 ± 0.1168 <sup>b</sup>

注:每行不同小写字母表示组间具有显著性差异, $P<0.05$ 。

2.7 氨基酸组成

汤中的氨基酸含量关系着汤的营养品质,还与汤的鲜美程度相关。由表 3 可知,除谷氨酸、天冬氨酸在熬煮 120 min 时有所下降以外,其它氨基酸含量均随熬煮时间的延长而增加然而其增加速率逐渐降低。汤在高压熬煮过程中,氨基酸不断从出骨粒中溶出,同时蛋白质及多肽降解产生氨基酸,所以氨基酸总体呈上升趋势。在不同熬煮时间段各种类氨基酸含量增加速率不同,甚至有所降低,这可能是由于汤体系中氨基酸的产生与溶出的同时,又进行着美拉德反应,斯托克降解等反应<sup>[23]</sup>,氨基酸作为反应物之一会被不断消耗,另外骨粒在熬煮前期结构致密,在高温、高压环境下,经过一段时间熬煮后,其内部结构会变的松散,小孔增多,会对氨基酸等小分子物质产生吸附作用。氨基酸可分为鲜、甜和苦味氨基酸,其含量如表 3 所示,甜味氨基酸含量>苦味氨基酸含量>鲜味氨基酸含量,说明猪头骨汤中甜味特征明显,这与张进<sup>[24]</sup>和赵静等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。甜味氨基酸能和鲜味氨基酸起到协同增鲜的效果,同时可以缓和骨汤的苦味,另外甜味氨基酸如丙氨酸通过氨基酸降解反应可生成挥发性风味物质乙醛,苯丙氨

酸降解产生挥发性风味物质苯甲醛<sup>[11]</sup>。苦味氨基酸中精氨酸含量最高,这与其它骨汤中有所差异,可能是由于猪头骨部位蛋白质氨基酸组成与其它部位不同。鲜味氨基酸不仅可以产生鲜美的滋味,也可以降解产生壬醛、2-庚酮、庚醛、2-正戊基呋喃等挥发性风味物质<sup>[26]</sup>。

从营养角度出发,猪头骨汤中胱氨酸含量低于检出限,说明胱氨酸是猪头骨汤的第一限制性氨基酸,第二限制性氨基酸是蛋氨酸(0.88~5.87 mg/100 g)这与赵静等<sup>[25]</sup>对棒骨汤、扇骨汤、脊骨汤、肋排汤的研究得出的结论一致,而猪头骨汤与不同部位骨汤的氨基酸含量差异较大,棒骨汤、扇骨汤、脊骨汤、肋排汤的 EAA/TAA 值分别为 0.22, 0.33, 0.19, 0.31, EAA/NEAA 值分别为 0.28, 0.49, 0.24, 0.44, 而猪头骨汤在 20~120 min 的高压熬煮时间下,其 EAA/TAA(%)与 EAA/NEAA(%)值范围分别为 0.18~0.19 和 0.22~0.23。说明猪头骨汤中氨基酸的营养价值低于棒骨汤、扇骨汤和肋排汤,而与脊骨汤类似。值得注意的是猪头骨汤赖氨酸含量达到 43.85~75.29 mg/100 g,而研究猪头骨汤的最终目的是开发一种预制冷冻猪头骨汤面,正好可以弥补面中赖氨酸的不足。



表 3 猪头骨汤熬煮过程中氨基酸含量变化  
Table 3 Changes in amino acid content during boiling of pork head bone broth

氨基酸种类	氨基酸含量/(mg/100 g)				
	20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
天冬氨酸	59.80 ± 0.68 <sup>d</sup>	52.57 ± 0.08 <sup>e</sup>	83.71 ± 0.81 <sup>b</sup>	99.71 ± 2.59 <sup>a</sup>	72.28 ± 2.27 <sup>c</sup>
谷氨酸	119.91 ± 1.55 <sup>e</sup>	132.67 ± 1.11 <sup>d</sup>	160.61 ± 1.12 <sup>c</sup>	191.87 ± 2.92 <sup>a</sup>	179.64 ± 2.33 <sup>b</sup>
总鲜味氨基酸	179.71	185.25	244.32	291.59	251.92
丝氨酸	37.62 ± 0.51 <sup>d</sup>	48.09 ± 0.71 <sup>c</sup>	49.40 ± 0.29 <sup>c</sup>	59.50 ± 0.61 <sup>b</sup>	61.71 ± 0.45 <sup>a</sup>
甘氨酸	284.20 ± 3.18 <sup>d</sup>	377.60 ± 7.01 <sup>c</sup>	380.74 ± 1.29 <sup>c</sup>	452.04 ± 2.26 <sup>b</sup>	469.55 ± 0.61 <sup>a</sup>
苏氨酸	24.36 ± 0.02 <sup>d</sup>	33.96 ± 0.45 <sup>b</sup>	29.84 ± 0.52 <sup>c</sup>	34.25 ± 1.02 <sup>b</sup>	37.08 ± 1.21 <sup>a</sup>
脯氨酸	177.53 ± 0.91 <sup>d</sup>	236.07 ± 4.73 <sup>c</sup>	233.60 ± 0.95 <sup>c</sup>	272.49 ± 1.24 <sup>b</sup>	284.00 ± 2.71 <sup>a</sup>
丙氨酸	101.14 ± 1.52 <sup>c</sup>	134.04 ± 2.42 <sup>b</sup>	135.92 ± 0.88 <sup>b</sup>	163.17 ± 3.30 <sup>a</sup>	169.53 ± 1.03 <sup>a</sup>
总甜味氨基酸	624.85	829.76	829.50	981.44	1021.87
组氨酸	9.09 ± 0.32 <sup>c</sup>	10.77 ± 0.69 <sup>b</sup>	11.26 ± 0.23 <sup>b</sup>	13.98 ± 0.20 <sup>a</sup>	15.04 ± 0.14 <sup>a</sup>
精氨酸	93.34 ± 1.48 <sup>d</sup>	113.06 ± 1.49 <sup>c</sup>	124.66 ± 0.81 <sup>b</sup>	149.17 ± 1.57 <sup>a</sup>	153.06 ± 1.22 <sup>a</sup>
酪氨酸	9.47 ± 0.10 <sup>c</sup>	8.96 ± 0.16 <sup>c</sup>	12.35 ± 0.11 <sup>b</sup>	15.24 ± 0.21 <sup>a</sup>	15.39 ± 0.15 <sup>a</sup>
缬氨酸	33.03 ± 0.63 <sup>d</sup>	43.13 ± 0.92 <sup>c</sup>	45.25 ± 0.34 <sup>c</sup>	54.80 ± 0.78 <sup>b</sup>	57.62 ± 0.68 <sup>a</sup>
蛋氨酸	2.72 ± 0.09 <sup>c</sup>	0.88 ± 0.02 <sup>d</sup>	3.23 ± 0.01 <sup>b</sup>	3.42 ± 0.09 <sup>b</sup>	5.87 ± 0.11 <sup>a</sup>
异亮氨酸	13.20 ± 0.28 <sup>d</sup>	16.86 ± 0.31 <sup>c</sup>	17.29 ± 0.19 <sup>c</sup>	20.32 ± 0.01 <sup>b</sup>	21.92 ± 0.08 <sup>a</sup>
亮氨酸	37.02 ± 0.61 <sup>d</sup>	47.99 ± 1.09 <sup>c</sup>	48.91 ± 0.17 <sup>c</sup>	59.14 ± 0.17 <sup>b</sup>	63.14 ± 0.09 <sup>a</sup>
苯丙氨酸	27.00 ± 0.27 <sup>d</sup>	35.65 ± 0.39 <sup>c</sup>	36.28 ± 0.43 <sup>c</sup>	43.45 ± 0.79 <sup>b</sup>	46.30 ± 0.41 <sup>a</sup>
赖氨酸	43.85 ± 1.16 <sup>d</sup>	52.11 ± 0.41 <sup>c</sup>	59.81 ± 0.59 <sup>b</sup>	73.03 ± 0.97 <sup>a</sup>	75.29 ± 0.79 <sup>a</sup>
总苦味氨基酸	268.72	329.39	359.04	432.54	453.63
胱氨酸	—	—	—	—	—
必需氨基酸	190.27	241.33	251.87	302.38	322.26
非必需氨基酸	883.00	1 103.07	1 180.99	1 403.19	1 405.16
氨基酸总量	1 073.28	1 344.39	1 432.86	1 705.56	1 727.42
EAA/TAA/%	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19
EAA/NEAA/%	0.22	0.22	0.21	0.22	0.23

注：每行不同小写字母表示组间具有显著性差异， $P<0.05$ ；“—”表示未检出。

2.8 核苷酸含量的变化

核苷酸对食品的香味和滋味具有重要影响，表 4 是不同高压熬煮时间下猪头骨汤中的核苷酸含量，高压熬煮 20~120 min 过程中，5'-AMP 含量先减小后有所增加，5'-IMP、5'-GMP、5'-CMP 含量均先增加后有所减小，分别在 40, 60, 40 min 时达到最大值 0.65, 0.79, 2.24 mg/100 mL，这是由于 5'-IMP、5'-GMP 含量的增加主要是由于 5'-AMP 的热降解<sup>[27]</sup>，之后含量减小可能是由于 5'-IMP、5'-GMP 也会在热环境下发生核苷酸脱磷酸反应和脱碱基反应，产生肌苷与次黄嘌呤<sup>[28]</sup>，该反应速率与环境 pH 和熬煮时间密切相关，表中次黄嘌呤和肌苷含量的增加也说明了该反应的进行，另外，5'-IMP 也可与汤体系中的其它呈味物质如氨基酸等发生反应产生挥发性风味物质。周

智雯<sup>[29]</sup>的研究发现 5'-IMP 的降解产物与挥发性风味物质含量间具有一定的相关性。5'-AMP 和 5'-CMP 是猪头骨汤中含量最丰富的核苷酸，5'-GMP 和 5'-IMP 含量虽较低，但 5'-GMP 和 5'-IMP 及其衍生物对于增强鲜味效果显著，王琳涵等<sup>[30]</sup>曾报道较低含量的 5'-IMP 可以与鸡汤中的甜味氨基酸起到协同增鲜的作用，5'-AMP 主要是增强甜味。黎琪等<sup>[31]</sup>研究了猪肉中的核酸含量，发现猪肉汤中 5'-IMP 含量最高，达到 133.9 mg/100 mL，显著高于猪头骨汤中的含量，说明纯骨汤与肉汤间味道差异显著。呈味核苷酸的代谢产物嘌呤被人体摄入后可产生尿酸，高尿酸积累易导致痛风，表中次黄嘌呤含量随熬煮时间延长不断增加并趋于稳定，所以应选择合理的熬煮时间。



表 4 猪头骨汤熬煮过程中核苷酸含量的变化  
Table 4 Changes in nucleotide content during boiling of pork head bone broth

核苷酸	核苷酸含量(mg/100 mL)				
	20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
次黄嘌呤	5.65 ± 0.024 <sup>c</sup>	6.65 ± 0.015 <sup>c</sup>	9.39 ± 0.033 <sup>b</sup>	10.40 ± 0.082 <sup>a</sup>	10.35 ± 0.077 <sup>a</sup>
肌苷	0.38 ± 0.012 <sup>c</sup>	2.19 ± 0.032 <sup>d</sup>	2.40 ± 0.012 <sup>c</sup>	3.30 ± 0.126 <sup>b</sup>	4.15 ± 0.014 <sup>a</sup>
5'-IMP	0.32 ± 0.015 <sup>c</sup>	0.65±0.022 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.014 <sup>c</sup>	0.46 ± 0.014 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.024 <sup>d</sup>
5'-AMP	3.53 ± 0.562 <sup>a</sup>	1.71±0.039 <sup>cd</sup>	1.68 ± 0.064 <sup>d</sup>	2.12±0.110 <sup>b</sup>	1.91 ± 0.046 <sup>bc</sup>
5'-GMP	0.38±0.033 <sup>c</sup>	0.76 ± 0.033 <sup>a</sup>	0.79±0.021 <sup>a</sup>	0.54 ± 0.015 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.027 <sup>d</sup>
5'-CMP	1.23±0.010 <sup>c</sup>	2.24 ± 0.015 <sup>a</sup>	1.65 ± 0.053 <sup>b</sup>	1.11 ± 0.032 <sup>d</sup>	1.139 ± 0.054 <sup>d</sup>

注：每行不同小写字母表示组间具有显著性差异， $P<0.05$ 。

2.9 电子鼻响应值分析

不同高压熬煮时间下猪头骨汤的电子鼻检测响应值如图 6a 所示,TA/2 探头对有机化合物敏感,其响应值最高并在熬煮 60 min 时达到最大值,之后趋于稳定,这与骨汤在熬煮时释放的挥发性有机风味物质相关。PA/2、P30/1 对胺类、含硫类、酮类及醇类化合物较敏感<sup>[32]</sup>,熬煮 60 min 和 90 min 时,其响应值比其它熬煮时间稍低,骨汤腥味较轻。T70/2 探头对芳香族化合物敏感<sup>[6]</sup>,不同熬煮时间下,该探头响应值先升高后降低,在 60 min 时达到最高,说明芳香类物质在熬煮过程中含量变化明显。另外,LY2 探头的响应值主要与有

毒气体、胺类与含硫类相关,其响应值较低甚至为负,可能是由于本研究的汤本身不涉及有毒气体的产生<sup>[33]</sup>。因此从电子鼻响应值来看,熬煮 60~90 min 猪头骨汤风味较好。基于电子鼻数据的 PCA 分析,由图 6b 可知,PC1 贡献率为 53.1%,PC2 贡献率为 28.8%,累计贡献率为 81.9%,大于 80%,可以代表样品的部分信息。不同熬煮时间猪头骨汤的气味特征值能较好的区分,熬煮 20~40 min 的汤主要分布在第 3、4 象限,熬煮 60~90 min 的汤分布在第 2 象限,熬煮 120 min 的汤分布在第 1 象限,而熬煮 60 min 和熬煮 90 min 的汤相距很近,不能得到很好的区分。

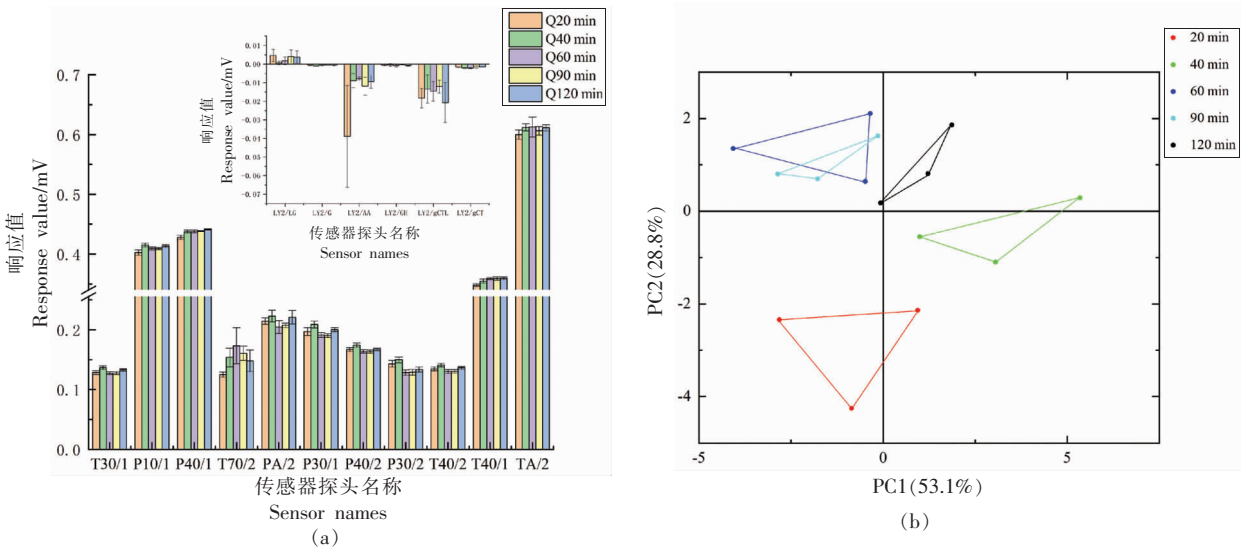


图 6 高压熬煮时间对猪头骨汤电子鼻响应值的影响(a)及 PCA 分析(b)

Fig.6 Effect of high pressure boiling time on e-nose response values of pork head bone broth (a) and PCA analysis (b)

2.10 电子舌响应值分析

不同电子舌探头对不同高压熬煮时间下的猪头骨汤的响应值,如图 7 所示。苦味(SCS)探头响

应值虽然最高,但由于苦味阈值较高和其它味觉成分的消除掩盖作用,在品尝时并感受不到苦味<sup>[34]</sup>。熬煮 60 min 比其它熬煮时间下汤的鲜味和

甜味探头响应值最高,说明熬煮 60 min 的汤的味觉特性更好。基于电子舌检测数据进行 PCA 分析,PC1 贡献率为 88.6%,PC2 贡献率为 9.4%,累计贡献率达到 98%,大于 90%,可以代表绝大部分的样品信息。熬煮 20~40 min 的汤分布在第 1、2

象限,熬煮 60 min 的汤分布在第 3、4 象限,熬煮 90 min 的汤主要分布在第 4 象限,熬煮 120 min 的汤分布在第 2 象限,说明高压熬煮时间对猪头骨汤滋味特性影响显著。

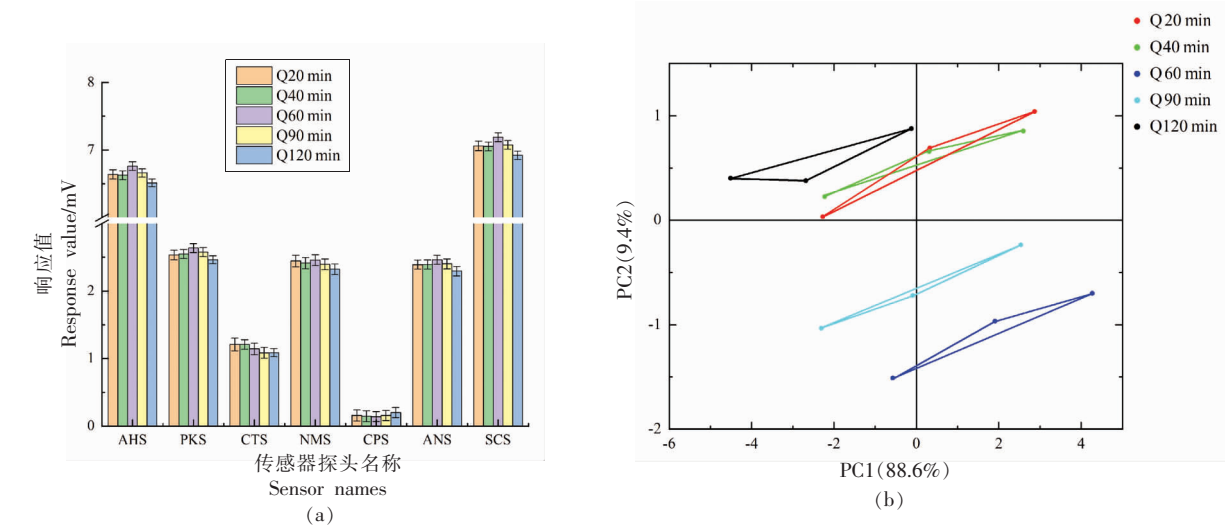


图 7 高压熬煮时间对猪头骨汤电子舌响应值的影响(a)及 PCA 分析(b)

Fig.7 Effect of high pressure boiling time on the response value of electronic tongue of pork head bone broth (a) and PCA analysis (b)

2.11 挥发性风味物质种类及含量的变化

如表 5 所示,猪头骨汤在 20~120 min 高压熬煮过程中,共鉴定出 116 种挥发性物质,包括醛类、醇类、酮类、酸类和烷烃、烯烃、芳香烃及其衍生物,不同熬煮时间下猪头骨汤中挥发性化合物种类数约 50~65 种,虽然种数差别不大,但不同熬煮时间下汤中挥发性物质含量差异较明显,这与付瑞青等<sup>[35]</sup>和 Meng 等<sup>[36]</sup>研究不同熬煮时间下羊肚菌汤、牛骨汤中挥发性物质种类变化情况一致,这是由于汤体系中不断发生脂质氧化降解及氨基酸和小肽的斯托克降解反应<sup>[37]</sup>,这些反应是挥发性风味化合物的主要来源,同时在高压热环境下挥发性化合物不断发生键的断裂与生成,挥发性化合物不断发生转化,另外有些化合物会由于挥发性较强而在熬煮过程中脱离汤体系。图 8 表明,在 20~90 min 熬煮过程中始终是醇类、醛类和烯烃类的种类个数排前三,除在熬煮 120 min 时,醇类和烯烃类有所增加外,其种类个数相对稳定;烷烃和酮类次之,分别主要来源于脂肪酸的断裂与多为不饱和脂肪酸的氧化降解,阈值较高<sup>[38]</sup>,通常

认为对风味影响不大;酯类、酸类、芳香烃及其它种类数最少,对汤体系风味贡献不如醇、醛、烯烃类大。

猪头骨汤中鉴定出 13 种醛类,其中己醛、庚醛、苯甲醛、壬醛、柠檬醛在 20~90 min 熬煮下均有检测到,己醛和壬醛先趋于稳定,后有所下降,苯甲醛含量不断增加,柠檬醛和庚醛含量先增加后降低,均在熬煮 40 min 时达到最大值。熬煮过程中醛类含量的降低可能是挥发性化合物降解转化、沉淀或强挥发性等原因导致<sup>[39]</sup>。己醛、庚醛、苯甲醛和壬醛能产生清香味、果香味和脂香味,主要来自油酸、亚麻酸、亚油酸等不饱和脂肪酸的氧化降解,据报道在体系温度达到 60~70 ℃时,脂肪酸即可降解产生醛类等物质<sup>[40]</sup>,醛类物质阈值较低且己醛、壬醛和柠檬醛相对含量较高,对猪头骨汤风味贡献较大。本文中的猪头骨采用高压熬煮方式,在骨汤进行熬煮时,周围环境已达到 90 ℃,所以在最初熬煮的 20 min 内,已有部分脂肪酸降解产生醛类并有一定的积累。汤中还检测到了其它的不饱和醛类如(*E*)-2-辛二烯醛、*E,E*-2,4-癸二

烯醛、*E*-2-癸烯醛等，也能够使汤产生让人愉快的香气<sup>[41]</sup>。

醇类也主要来自脂质降解，可氧化成醛或参加酯化反应。不同熬煮时间的汤中均鉴定出 10 种以上醇类，通常饱和醇类阈值较高，而不饱和醇阈值较低<sup>[41]</sup>，1-辛烯-3-醇可由亚油酸降解产生，具有蘑菇特征香气，在熬煮 60 min 前的猪头骨汤中含量比之后要高，对于提升汤汁香气效果明显。还检测到由于生姜加入而产生的桉叶油醇、 $\alpha$ -松油醇、芳樟醇、4-萜烯醇、2-茨醇、香茅醇等萜类物质，可以产生樟脑香、丁香花香、胡椒香、玫瑰香及松香等特征香气<sup>[38]</sup>，会对汤汁风味产生一定影响。随着熬煮时间延长，会有新的醇类产生，如(1*R*, 5*S*)-*rel*-香芹醇、榄香醇及 1-辛醇等，也可产生香料的气味。熬煮时间为 120 min 时，汤中醇类丰富度有所提高。脂肪酸进一步氧化可生成酮类物质，由图 8 可知，在熬煮 20~40 min 时酮类种类较少，之后有所增加，可能会对猪头骨汤的风味起到修饰作用，如甲基庚烯酮在 20~120 min 熬煮过程中均有检测到，且在 40~90 min 相对含量较高，它具有柠檬草和乙酸异丁酯的气味<sup>[42]</sup>，可能对猪头骨汤风味有一定的贡献。

猪头骨汤中鉴定到的烃类包括烷烃、烯烃和芳香烃。烷烃主要由高级脂肪酸脱羧或碳碳键断裂产生，对猪头骨汤风味影响较小，然而对汤体系风味起协调作用<sup>[2]</sup>。烯烃含量最为丰富，如(-)-苧

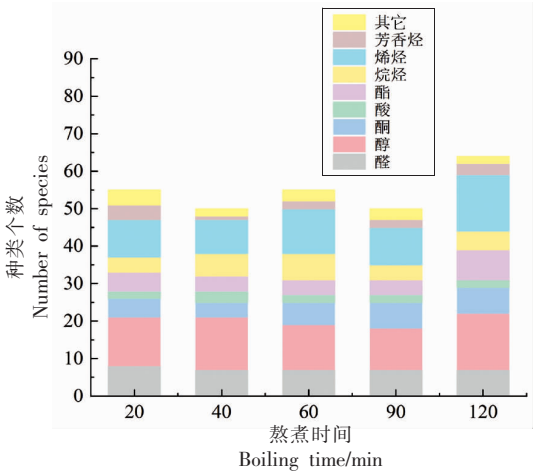


图 8 猪头骨汤熬煮过程中挥发性风味物质种类变化  
Fig.8 Changes in volatile flavor species during boiling of pork skull soup

烯、*A*-姜黄烯、*A*-姜烯、 $\beta$ -红没药烯、 $\beta$ -倍半水芹烯、 $\beta$ -榄香烯、 $\gamma$ -桉叶烯、3-萜烯等，萜烯类物质也主要来自生姜。鉴定到的芳香烃有 2,4-二叔丁基酚、2-乙基对二甲苯、丁香酚等，多数芳香烃阈值较高，对猪头骨汤风味贡献不大。另外酯类和酸类在各个熬煮时间下种类较少且含量较低，可能是由于其挥发性较差，据报道酯类和酮类共存于汤体系时，对整体风味有平衡协调的效果<sup>[43]</sup>。猪头骨汤中还检测到一些其它类别的挥发性物质，然而其相对含量均较低，对汤体系风味影响较小。

表 5 猪头骨汤熬煮过程中挥发性风味物质相对含量变化

Table 5 Changes in the relative content of volatile flavor substances during the boiling of pork skull soup		相对含量				
种类	名称	20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
醛类	环己酮(内标物)	1	1	1	1	1
	己醛	1.275	1.263	0.684	0.652	0.664
	庚醛	0.533	1.562	0.192	0.123	0.150
	苯甲醛	0.170	0.164	0.173	0.177	0.197
	( <i>E</i> )-2-十六烯醛	0.259	—	—	—	—
	壬醛	0.932	0.838	0.808	1.042	0.774
	( <i>E</i> )-2-辛二烯醛	0.320	—	—	0.133	—
	柠檬醛	2.369	6.486	1.554	0.952	0.474
	<i>E,E</i> -2,4-癸二烯醛	0.102	—	0.117	—	—
	<i>E</i> -2-癸烯醛	—	0.136	—	—	—
	桃金娘烯醛	—	0.151	—	—	—
	4-丙基苯甲醛	—	—	3.529	2.890	2.077
	十六醛	—	—	—	—	0.148

(续表 5)

种类	名称	相对含量				
		20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
酮类	甲基庚烯酮	2.613	5.200	3.582	4.458	2.676
	鳶尾酮	0.114	—	—	0.119	0.085
	甲基(2,2-二甲基环己基)酮	0.266	0.210	—	—	—
	甲基辛基甲酮	0.194	—	0.338	0.358	0.345
	马鞭草烯酮	0.122	—	0.079	—	—
	2-十六烷酮	—	0.123	—	—	—
	十八酮	—	0.084	—	—	—
	2-壬酮	—	—	0.169	0.181	0.211
	2-(2-甲基-丙烯基)-环己酮	—	—	0.197	0.242	0.228
	六氢假紫罗酮	—	—	0.221	—	—
	2-十一酮	—	—	—	0.193	0.350
	11-去氢皮质甾酮	—	—	—	0.076	0.046
醇类	桉叶油醇	7.682	2.143	1.675	1.317	1.031
	4-萜烯醇	1.944	0.456	0.325	0.273	0.252
	1-辛烯-3-醇	0.306	0.368	0.147	0.160	0.139
	$\alpha$ -松油醇	0.277	1.963	1.370	—	1.202
	反式-2-辛烯-1-醇	0.059	0.060	—	—	—
	芳樟醇	0.464	0.740	0.511	0.662	0.388
	(-)-异戊醇	0.230	0.586	—	—	0.140
	2,6-辛二烯-1,8-二醇	0.218	0.308	0.379	0.351	0.403
	2-茨醇	6.081	3.232	2.528	1.453	2.292
	香茅醇	0.432	0.619	0.295	0.156	0.273
	香叶醇	0.320	0.450	—	—	—
	2-丁基-1-辛醇	0.245	—	—	—	—
	$\alpha$ -萜蒲醇	0.140	—	—	—	0.109
	3,5-辛二烯-2-醇	—	0.080	—	—	—
	(1R,5S)-rel-香芹醇	—	0.540	0.392	0.484	0.350
	顺式对薄荷醇-1(7),8-二烯-2-醇	—	0.410	—	—	0.125
	榄香醇	—	0.152	0.068	0.069	0.174
	异蒲勒醇	—	—	0.562	—	—
	顺式对甲基-2,8-二烯-1-醇	—	—	0.087	—	—
	E-2-甲基-3,13-十八碳二烯-1-醇	—	—	0.065	0.695	0.677
	1-辛醇	—	—	—	0.128	0.138
烯烃	(-)-茨烯	0.636	0.597	0.419	0.351	0.843
	顺式茴香烯	0.248	—	—	—	—
	A,3-二甲基苯乙烯	0.424	—	—	—	0.356
	3-萜烯	0.086	0.080	0.179	—	—
	二十一(碳)烯	0.676	0.758	—	—	—
	1-二十四烯	0.352	0.322	—	—	—
	$\alpha$ -姜黄烯	1.497	2.586	1.825	2.868	3.576
	$\alpha$ -姜烯	0.884	1.647	1.160	1.821	2.481
	$\beta$ -红没药烯	0.257	—	0.305	0.619	0.740
	$\beta$ -倍半水芹烯	0.454	0.798	0.503	0.821	1.038
	3-十七烯	—	0.149	—	—	—
	$\beta$ -榄香烯	—	0.147	0.153	—	0.044
	A,3-二甲基苯乙烯	—	—	0.370	0.281	—
	$\gamma$ -桉叶烯	—	—	0.077	0.096	0.128
	(-)- $\alpha$ -蒎烯	—	—	0.060	—	0.141
	B-蒎烯	—	—	0.236	—	0.243
	雪松烯	—	—	0.082	0.176	0.218



(续表 5)

种类	名称	相对含量				
		20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
烷烃	(-)- $\beta$ -花柏烯	—	—	—	0.081	0.077
	$\gamma$ -芹子烯	—	—	—	0.394	0.188
	罗勒烯	—	—	—	—	0.048
	(+)-双环大根香叶烯	—	—	—	—	0.063
	2,6,10-三甲基十四烷	0.164	0.109	0.063	0.071	0.086
	正十七烷	0.150	0.288	—	—	—
	十三烷	0.098	—	—	—	—
	正二十四烷	0.091	—	—	0.070	0.047
	十五烷	—	0.291	—	—	0.158
	正十九烷	—	0.241	—	—	—
	十三烷	—	0.218	—	—	—
	二十五烷	—	0.126	—	—	—
	七烷	—	—	0.241	—	—
	苯咯戊烷	—	—	0.841	0.979	1.285
	5-乙基癸烷	—	—	0.107	—	—
	5-甲基二十二烷	—	—	0.118	—	—
	正二十烷	—	—	0.298	—	—
	正十八烷	—	—	0.114	—	—
	正十九烷	—	—	—	0.189	0.238
	2,6-二甲基十一烷	—	—	—	—	0.133
芳香烃	十四烷	—	—	—	—	0.098
	2-乙基对二甲苯	0.376	—	—	0.344	0.271
	对丙烯基茴香醚	2.406	—	—	—	—
	丁香酚	0.406	—	—	—	—
	2,4-二叔丁基酚	1.166	0.922	1.021	—	0.661
	5-乙基-3,5-二甲基苯	—	—	0.359	—	0.054
	香叶乙烯基醚	—	—	—	0.054	—
酯类	丁位十四内酯	0.093	0.222	0.153	—	—
	甲酸辛酯	0.190	—	—	—	—
	棕榈酸-2-壬醇酯	0.910	—	—	—	—
	戊曲酯	0.311	0.099	—	0.110	0.179
	2-[(Z)-十八烷-9-烯氧基]乙基十八酸酯	0.271	0.191	0.193	—	0.245
	4-甲基香豆素-7,8-二基二苯甲酸酯	—	—	0.164	—	—
	氯甲基辛酯	—	—	0.162	—	—
	12,15-十八碳二炔酸甲酯	—	—	—	0.112	0.047
	己酸,十三碳-2-炔基酯	—	—	—	0.122	0.141
	(E)-10-十七碳-8-烯酸甲酯	—	—	—	—	0.055
酸类	3-溴-4-(4-氯苯基)-4-氧丁酸	0.386	0.488	0.352	0.363	0.345
	3-(1-羟基-2-异丙基-5-甲基环己基)对丙酸	0.321	0.314	—	0.184	0.162
	十八碳-6-烯酸	—	0.089	—	—	—
	啤酒花酸	—	—	0.443	—	—
其它	甲氧基苯酚	0.641	—	0.571	0.530	0.607
	樟脑	0.093	0.127	0.076	—	0.048
	(6,6-二甲基二环[3.1.1]庚-2-基)甲胺	0.601	—	—	—	0.582
	2-十五基-4-(十六基氧基)-1,3-二噁烷	0.067	0.312	0.069	—	0.063
	3,7-二甲基辛基-2,6-二烯-1-醇-4-苯硫基	—	—	—	0.150	0.337
	十六醛-2-十六烷基胺	—	—	—	0.149	—
	16 $\beta$ -羟基咪唑啉	—	—	—	—	0.068
	海葱次苷	—	—	—	—	0.091

注:“—”表示未检出。

### 3 结论

适当的高压熬煮会促进猪头骨中营养物质和风味成分的释放,同时熬煮过程中溶出的物质在复杂的物理化学反应下组装成小颗粒并进行聚集,进而影响汤体系的稳定性。在20~120 min的高压熬煮过程中,固形物、可溶性蛋白、总糖、矿物质含量总体呈上升趋势。物质的溶出会改变汤体系的色泽,熬煮60 min时,具有较高的白度与亮度。另外,汤中形成的颗粒不断增多,其粒径随熬煮时间延长而减小,在90 min时达到最小值后略有增大,电位绝对值不断降低,并在60 min后趋于稳定。多数脂肪酸、谷氨酸及天冬氨酸在熬煮90 min前含量不断提高,在熬煮120 min时有所降低,其它氨基酸含量均增加。呈味核苷酸中5'-AMP含量先减小后有所增加,其它核苷酸含量均先增加后有所减小,在40~60 min时达到最大值。电子鼻和电子舌响应值显示熬煮60 min和90 min的猪头骨汤气味特性较好,腥味较轻,熬煮60 min的猪头骨汤鲜味响应值最高;醛类、醇类及烯烴类是猪头骨汤中主要挥发性风味物质,不同煮制时间的样品挥发性风味物质种类及相对含量差异明显。综合分析认为,高压熬煮60 min是制作猪头骨汤的最佳熬煮时间,此时营养物质含量较高,体系较稳定,风味较好,虽然熬煮90 min时的猪头骨汤品质特性与熬煮60 min不相上下,但从工业化生产的角度分析,选择60 min可大大节约能耗和时间。

#### 【致谢】

本文得到“骨汤产品研究及标准化应用项目(IRIFH202220)”的支持。

#### 参 考 文 献

- [1] 樊馨怡, 陶宁萍, 王锡昌. 汤中物质的溶出、迁移以及微纳米颗粒形成的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 355-359.  
FAN X Y, TAO N P, WANG X C. Research progress on the leaching, migration of substances in soup, and the formation of micro-nano particles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40 (17): 355-359.
- [2] GUAN H N, YANG C, TIAN Y L, et al. Changes in stability and volatile flavor compounds of self-emulsifying chicken soup formed during the stewing process[J]. LWT, 2023, 175: 114520.
- [3] 张静妍. 牛骨汤与排骨藕汤常压及高压炖制工艺研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.  
ZHANG J Y. Study on the cooking process of beef bone soup and pork rib lotus root soup under normal and high pressure[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [4] HE W, ZHU W H, BU Y, et al. Formation of colloidal micro-nano particles and flavor characteristics of Greenland halibut bone soup[J]. J Food Sci, 2022, 87(1): 216-230.
- [5] REN M T, YIN T, YOU J, et al. Comparative study of the nutritional composition and antioxidant ability of soups made from wild and farmed snakehead fish (*Channa argus*)[J]. Foods, 2022, 11(20): 3294.
- [6] ZOU J, XU M J, ZOU Y F, et al. Chemical compositions and sensory characteristics of pork rib and Silkie chicken soups prepared by various cooking techniques[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128755.
- [7] 任佳铎, 翟营营, 黄晶晶, 等. 酵母抽提物滋味成分分析及其复合调味料对鲢鱼风味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 210-217.  
REN J Y, ZHAI Y Y, HUANG J J, et al. Analysis of flavor components in yeast extract and its effect on the flavor of silver carp in compound seasoning[J]. Food Science, 2020, 41(16): 210-217
- [8] 刘振艳, 杨文钦, 钞虹, 等. 玉米须水提物氨基酸组成分析及营养价值及风味评价[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(6): 109-114.  
LIU Z Y, YANG W Q, CHAO H, et al. Analysis of amino acid composition and nutritional value and flavor evaluation of corn silk water extract[J]. China Food Additives, 2022, 33(6): 109-114.
- [9] ZHU W H, HE W, WANG W X, et al. Effects of thermoultrasonic treatment on characteristics of micro-nano particles and flavor in Greenland halibut bone soup[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 79: 105785.
- [10] 曾文浩, 熊怡婷, 熊善柏, 等. 酵母葡聚糖对鲢鱼肉挥发性成分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 94-104.  
ZENG W H, XIONG Y T, XIONG S B, et al. Ef-

- fect of yeast glucan on volatile components of silver carp meat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 94–104.
- [11] LAI J, WU R Y, WANG J, et al. Effect of cooking modes on quality and flavor characteristic in Clitocybe squamulose chicken soup[J]. Front Nutr, 2022, 9: 1048352.
- [12] 张建友, 邹鹏, 茹巧美, 等. 热处理对猪骨高汤品质变化的影响研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(3): 143–146.
- ZHANG J Y, KUAI P, RU Q M, et al. Study on the effect of heating on the quality of pig bone soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(3): 143–146.
- [13] LIN L, TAO N P, SU H, et al. Migration of nutrients and formation of micro/nano-sized particles in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*) head soups[J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100646.
- [14] HAN M L, BU Y, HE W, et al. Effects of different thermoultrasonic time on quality characteristics of fishbone broth and correlation analysis on taste substances[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e17259.
- [15] 冯瑶, 樊一鸣, 任洪利, 等. 炒制时间对不同复配比例黑皮鸡枞菌-平菇复合酱风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 275–282.
- FENG Y, FAN Y M, REN H L, et al. Effect of cooking time on the flavor of *Oudemansiella raphanipes*-oyster mushroom mixed sauce with different mixing ratios[J]. Food Science, 2022, 43(20): 275–282.
- [16] QI J, ANG H H, ZHANG W W, et al. Identification and characterization of the proteins in broth of stewed traditional Chinese yellow-feathered chickens[J]. Poultry Science, 2018, 97(5): 1852–1860.
- [17] YAO H, LIU W, LIN L, et al. Micro-nano particle formation and transformation mechanisms of broth in meat braised processing[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128383.
- [18] QI J, JIA C K, ZHANG W W, et al. Ultrasonic-assisted stewing enhances the aroma intensity of chicken broth: A perspective of the aroma-binding behavior of fat[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133913.
- [19] FAN X Y, LI X P, TAO N P, et al. Effect of salt addition time on the nutritional profile of *Thunnus obesus* head soup and the formation of micro/nano-sized particle structure[J]. Molecules, 2019, 24(24): 4447.
- [20] WOODSIDE J V, MCKINLEY M C, YOUNG I S. Saturated and trans fatty acids and coronary heart disease[J]. Current Atherosclerosis Reports, 2008, 10(6): 460–466.
- [21] 倪冬冬, 李洪军, 贺稚非, 等. 大鲵汤加工过程中营养品质变化规律[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 119–124.
- NI D D, LI H J, HE Z F, et al. Changes in nutritional quality during the processing of giant salamander soup[J]. Food Science, 2017, 38(20): 119–124.
- [22] 马晨晨. 大眼金枪鱼头汤微/纳胶粒的形成机制及功能特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- MA C C. Study on the formation mechanism and functional characteristics of micro/nanogel particles in bigeye tuna head soup[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [23] LI X Y, MENG H L, ZHU Y W, et al. Correlation analysis on sensory characteristics and physico-chemical indices of bone broth under different processing methods[J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100036.
- [24] 张进. 传统羊骨汤营养特征及其加工工艺优化研究[D]. 成都: 西华大学, 2012.
- ZHANG J. Study on the nutritional characteristics and process optimization of traditional lamb bone soup[D]. Chengdu: Xihua University, 2012.
- [25] 赵静, 丁奇, 孙颖, 等. 猪骨汤中的游离氨基酸及其呈味特征分析[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(18): 1–6.
- ZHAO J, DING Q, SUN Y, et al. Analysis of free amino acids and their flavor characteristics in pork bone soup[J]. Food Research and Development, 2015, 36(18): 1–6.
- [26] ZHOU R Y, GRANT J, GOLDBERG E M, et al. Investigation of low molecular weight peptides (<1 kDa) in chicken meat and their contribution to meat flavor formation[J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(4): 1728–1739.
- [27] 王媛媛, 李学鹏, 王金厢, 等. 蒸煮方式对鲑鱼头汤呈味特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 58–65.

- WANG Y Y, LI X P, WANG J X, et al. Effects of cooking methods on the flavor characteristics of cod head soup[J]. Food Science, 2021, 42(15): 58-65.
- [28] 胡奇杰, 朱佳茜, 陈褚建, 等. 太湖蟹加工过程中呈味核苷酸变化规律研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(22): 102-104, 71.
- HU Q J, ZHU J X, CHEN C J, et al. Study on the changes of flavor nucleotides during the processing of Taihu crabs[J]. Food Research and Development, 2017, 38(22): 102-104, 71.
- [29] 周智雯. 不同烹饪方式对羊肉品质及嘌呤含量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- ZHOU Z W. Effects of different cooking methods on the quality and purine content of lamb[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [30] 王琳涵, 乔凯娜, 丁奇, 等. 不同煮制时间对鸡汤中呈味物质的影响[J]. 精细化工, 2018, 35(10): 1683-1690.
- WANG L H, QIAO K N, DING Q, et al. Effects of different cooking times on flavor substances in chicken soup[J]. Fine Chemicals, 2018, 35(10): 1683-1690.
- [31] 黎琪, 李晓敏, 姜德铭, 等. 高效液相色谱法检测熟制猪肉中呈味核苷酸[J]. 肉类研究, 2022, 36(3): 26-31.
- LI Q, LI X M, JIANG D M, et al. Detection of flavor nucleotides in cooked pork by high-performance liquid chromatography[J]. Meat Research, 2022, 36(3): 26-31.
- [32] 郑文栋, 楼倚洋, 安玥琦, 等. 臭氧漂洗及冷冻贮藏对鲢鱼糜蛋白氧化和风味的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 154-162.
- ZHENG W D, LOU Y Y, AN Y Q, et al. Effects of ozone washing and freezing storage on myofibrillar protein oxidation and flavor of silver carp[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 154-162.
- [33] 蔡雨静, 张振宇, 王彩玲, 等. 电子鼻、电子舌结合SPME-GC-MS对青海玉树牦牛肉挥发性化合物分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 348-357.
- CAI Y J, ZHANG Z Y, WANG C L, et al. Analysis of volatile compounds in Yushu yak meat from Qinghai using electronic nose, electronic tongue, and SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 1-14.
- [34] HEYER B R, TAYLOR-BURDS C C, TRAN L H, et al. Monosodium glutamate and sweet taste: Generalization of conditioned taste aversion between glutamate and sweet stimuli in rats[J]. Chemical Senses, 2003, 28(7): 631-641.
- [35] 付瑞青, 王娟, 郭衍银, 等. 基于GC-MS和氨基酸分析的羊肚菌汤适宜煮制时间研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 290-297.
- FU R Q, WANG J, GUO Y Y, et al. Study on the suitable cooking time for morel soup based on GC-MS and amino acid analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 290-297.
- [36] MENG Q, ZHOU J, GAO D, et al. Desorption of nutrients and flavor compounds formation during the cooking of bone soup[J]. Food Control, 2022, 132: 108408.
- [37] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: A review[J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 415-424.
- [38] 贡慧, 杨震, 史智佳, 等. 不同熬煮时间对北京酱牛肉挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(10): 183-190.
- GONG H, YANG Z, SHI Z J, et al. Effects of different cooking times on volatile flavor components of Beijing soy sauce beef[J]. Food Science, 2017, 38(10): 183-190.
- [39] FRANK D, KACZMARSKA K, PATERSON J, et al. Effect of marbling on volatile generation, oral breakdown and in mouth flavor release of grilled beef[J]. Meat Sci, 2017, 133: 61-68.
- [40] 崔伟, 孟祥忍, 高子武, 等. 牛肉低温蒸煮过程中挥发性风味成分及其前体物动态变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 20-28, 244.
- CUI W, MENG X R, GAO Z W, et al. Dynamic changes of volatile flavor components and their precursors during low-temperature steaming of beef[J]. Food and Machinery, 2022, 38(4): 20-28, 244.
- [41] 姬云云, 詹萍, 田洪磊. 炖煮时间对羊肉汤风味品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 256-267.
- Ji Y Y, ZHAN P, TIAN H L. Effect of stewing time on flavor quality of lamb soup[J]. Journal of Chinese Food Science, 2020, 20(12): 256-267.
- [42] 马紫峰, 李丹, 蒋洪忠, 等. 甲基庚烯酮的合成技术及应用进展[J]. 化工进展, 2001(2): 31-33.



MA Z F, LI D, JIANG Q Z, et al. Advances in the synthesis technology and applications of methyl heptenone[J]. Chemical Industry Progress, 2001 (2): 31–33.

特性的变化[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 202–207.

FENG Y, ZHAO H L, QU S Y, et al. Changes in flavor characteristics during the cooking process of catfish soup[J]. Food Science, 2020, 41(8): 202–207.

[43] 冯媛, 赵洪雷, 曲诗瑶, 等. 海鲢鱼汤烹制过程中风味

## Effect of High-Pressure Boiling Time on the Physical and Chemical Properties and Flavor Quality of Pork Skull Broth

Zhang Dongmei<sup>1</sup>, Shi Miao<sup>1</sup>, Chen Miao<sup>2</sup>, Yin Tao<sup>1</sup>, Liu Ru<sup>1</sup>, You Juan<sup>1\*</sup>

<sup>(1)</sup>College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University/National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), Wuhan 430070

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070

**Abstract** To reveal the patterns of nutrient migration and changes in flavor characteristics of pork skull soup during high-pressure boiling. The nutritional composition, particle characteristics and flavor components of pork skull soup were determined under high-pressure boiling times (20, 40, 60, 90 min and 120 min) using pork skull as raw material, and the sensory evaluation of the soup was performed using electronic tongue and electronic nose techniques. The results showed that the contents of solids, soluble protein, total sugar and minerals showed an overall increasing trend during boiling, and the bone broth had high whiteness and brightness at 60 min. The particle size of bone broth  $D[3,2]$  and  $D[4,3]$  reached the minimum value at 90 min of boiling and then increased slightly, the absolute value of potential decreased continuously and stabilized after 60 min of boiling. The microstructure showed that the particles increased during the boiling process, and some aggregated particles appeared at 120 min. The content of most fatty acids and glutamic acid and aspartic acid increased during the boiling process from 20 min to 90 min, and then decreased, while the content of other amino acids increased. 5'-AMP decreased and then increased, and 5'-IMP, 5'-GMP, 5'-CMP content all increased first and then decreased, and reached the maximum value at 40, 60 min and 40 min, respectively. The electronic nose and electronic tongue data showed that the odor and taste of pork head bone broth with different high pressure boiling time had large differences, and the odor characteristics of pork head bone broth boiled for 60 min and 90 min were better and light fishy smell. The response value of freshness was the highest in 60 min boiling pork head bone soup. Aldehydes, alcohols and olefins were the main volatile flavor substances in pork head bone soup, and the types and relative contents of volatile flavor substances varied among samples with different boiling times. The comprehensive analysis concluded that 60 min of high pressure boiling was the best boiling time for making pork skull soup, which had higher nutrient content, more stable system and better flavor.

**Keywords** pork skull; flavor; boiling time; nutrition