DOI:10.12441/spyswjs.20230128001 [文章编号] 1673-1689(2025)05-0127-10

热处理对I型胶原蛋白与肉汤香气物质结合能力的影响

骆晓林[1] 袁 毅[1] 陈祥仪[2] 刘树滔[1*]

(1. 福州大学生物科学与工程学院,福建 福州 350002; 2. 福州大学至诚学院,福建 福州 350002)

摘要:【目的】研究胶原蛋白在煮制过程中与挥发性物质间的相互作用。**【方法】**对加热后胶原蛋白的相对分子质量、粒径、溶解度、二级结构、表面疏水性以及形成的胶原蛋白乳液的粒径进行分析,并分别探究胶原蛋白水溶液和乳液与挥发性物质的结合能力。**【结果】**随着加热时间的延长,胶原蛋白的三螺旋结构被破坏且多肽链发生降解,同时伴随着胶原蛋白表面疏水性的降低、溶解度的升高以及热聚集。胶原蛋白与挥发性物质的结合能力随着加热时间的延长而逐渐降低,并且在水溶液体系中,胶原蛋白加热 4 h 后反而促进挥发性物质的释放。而在乳液体系中,胶原蛋白展现出更强的结合能力,即使加热时间达到 4 h 后也未表现出促进挥发性物质释放的作用。**【结论】**完整的胶原蛋白三螺旋结构有利于保留更多的挥发性物质,加热时间与胶原蛋白结合挥发性物质的能力呈负相关,胶原蛋白在短时加热以及与油脂共存的情况下结合挥发性物质的能力最强。

关键词:热处理;胶原蛋白;挥发性物质

Effects of Thermal Treatment on the Binding Ability of Type I Collagen to Aroma Compounds of Broth

LUO Xiaolin[1] *YUAN Yi*[1] *CHEN Xiangyi*[2] *LIU Shutao*[1*]

(1. College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Zhicheng, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to reveal the interactions between collagen and volatile compounds during the cooking process. [**Method**] The relative molecular weight, particle size, solubility, secondary structure, and surface hydrophobicity of collagen and the droplet size of the collagen emulsion were studied. Furthermore, the binding ability of collagen to volatile compounds of the aqueous and emulsion systems of collagen was measured. [**Result**] As the heating time was extended, the triple-helix structure of collagen was destroyed and the polypeptide chains were degraded, which were accompanied with the decrease in surface hydrophobicity, increase in solubility, and heat-induced aggregation. The binding ability of collagen to volatile compounds gradually decreased with the extension of heating time. In the aqueous system, the release of volatile compounds was promoted after heating for 4 h. In the emulsion system, collagen exhibited a higher binding ability to volatile compounds and did not exhibit the effect of promoting release of volatile compounds even after heating for 4 h. [**Conclusion**] The triple-helix structure of collagen is beneficial to the binding to volatile compounds and the heating time has a negative correlation with the binding ability of collagen to volatile compounds. Collagen exhibits the strongest binding ability to volatile compounds in the case of short-term heating and the coexistence with lipids.

Keywords: thermal treatment; collagen; volatile compound

基金项目:福建省科技厅引导性项目(2023N0001);福建省大学生创新创业项目(S202213470032)。

通信作者:刘树滔(1970—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品营养与健康、中餐的标准化与工业化研究。E-mail:stliu@fzu.edu.cn

收稿日期:2023-01-28 **修回日期:**2023-02-02

肉类是人类餐桌上不可或缺的食品之一。国家统计局公布的数据显示，我国2021年猪牛羊禽肉产量约8 887万t，比上年增长16.3%[1]。在多样的肉制品中，营养流失少且口感丰富的肉汤制品越来越受到人们的喜爱。肉类原材料经过炖煮后，脂质、水溶性蛋白质和糖类等物质向汤中迁移[2]，并自聚集形成微纳米颗粒[3]，同时发生的蛋白质降解、脂质氧化和美拉德反应等可产生肉汤的香气和滋味物质[4]。

肉汤的香气特征直接影响肉汤品质的优劣。影响肉汤香气特征的因素众多，如烹饪方式、烹饪时间[5]、原料性质[6]以及冷藏[7]等因素。此外，蛋白质与挥发性物质之间的相互作用也是影响肉汤香气特征的重要因素之一。蛋白质可以与挥发性物质形成可逆的非共价键，包括疏水相互作用、静电相互作用、氢键和范德华力[8]，这些非共价键键能较弱，因此蛋白质与挥发性物质的相互作用易受到外界条件的影响。如pH[9]、热处理[10-11]、盐类[12-13]、氧化体系[14-15]以及微波处理[16]等。

胶原蛋白是动物体内含量最丰富的蛋白质之一，主要分布于皮肤、骨骼、肌腱等部位，也是细胞外基质的主要成分[17]。它具有良好的生物相容性、生物降解性，在功能性食品和食品包装领域应用广泛[18]。存在于动物组织中的胶原蛋白在加热过程中的消化率会发生改变[19]，从而对肉汤的营养价值产生影响，而胶原蛋白在热加工过程中对肉汤香气特征的影响尚不清楚。

热处理作为最常用的食品加工手段，会影响蛋白质与挥发性物质之间的相互作用。Qi等[20]发现将明胶加热4 h后，其对壬醛、2-庚酮、1-辛烯-3-醇、乙酸己酯和2-戊基呋喃的结合能力提高了2.2~2.8倍。已有大量研究表明，热处理会影响蛋白质对挥发性物质的作用，但是多数研究集中于肌原纤维蛋白[10-11,21]及豌豆分离蛋白[8,22]、大豆分离蛋白[23]等一些植物蛋白，关于胶原蛋白与挥发性物质间相互作用的研究还较少。因此，研究胶原蛋白在煮制过程中与挥发性物质间的相互作用，有助于明确胶原蛋白对肉汤香气的影响机制以及为肉汤煮制工艺的优化提供参考。

因此，以猪皮中提取的I型胶原蛋白和5种广泛存在于各种肉汤中的挥发性物质（己醛、壬醛、2-壬酮、2-戊基呋喃、1-辛烯-3-醇）[5-6]为研究对象，参考实际肉汤中主要物质的含量，建立了胶原蛋白-挥发性物质和胶原蛋白-挥发性物质-甘油三酯复合体系，测定了胶原蛋白在加热条件下的粒径、二级结构、表面疏水性、相对分子质量、溶解度以及在2种不同体系下挥发性物质的游离率，旨在阐明胶原蛋白与挥发性物质的结合途径以及在不同热加工条件下对挥发性物质的作用差异及机制。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猪皮：福州市上街镇永辉超市；己醛、壬醛、2-壬酮、2-戊基呋喃、1-辛烯-3-醇、尼罗红、尼罗蓝：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；透析袋（截留相对分子质量8 000~14 000）：北京索莱宝科技有限公司；BCA蛋白质浓度试剂盒：碧云天生物技术公司；中链甘油三酯：上海源叶生物科技有限公司；NaCl、$Ca(OH)_2$、乙醇：天津市大茂化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

气相色谱-质谱联用仪：5977A型，安捷伦科技（中国）有限公司；固相微萃取头：50/30 μm DVB/CAR/PDMS型，美国Supelco公司；多功能酶标仪：SpectraMax iD3型，美谷分子仪器（上海）有限公司；电泳仪：JS-power300型，上海培清科技有限公司；圆二色光谱（CD）仪：J-1500型，日本JASCO公司；高速均质机：T10 basic型，艾卡（广州）仪器设备有限公司；纳米粒度电位仪：Zetasizer Nano ZS90型，英国Malvern Panalytical公司；激光粒度分析仪：Mastersizer3000型，英国Malvern Panalytical公司；激光共聚焦显微镜（CLSM）：Nikon A1型，日本尼康仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 猪皮胶原蛋白的提取

猪皮胶原蛋白的提取参考叶韬等[24]的方法并稍加改动。猪皮样品经过清洗、晾干水分后，刮去表面脂肪并切成小块。脱脂8 h后，按照料液比1 g∶10 mL，加入0.1 mol/L NaOH浸泡除去杂蛋白质，离心收集沉淀。按照料液比1 g∶5 mL，加入0.5 mol/L乙酸提取胶原蛋白，向提取液中加NaCl至终浓度为2.3 mol/L，离心收集沉淀并复溶于0.5 mol/L的乙酸，先在0.01 mol/L乙酸中透析48 h，再用一级水透析48 h。冻干后即为猪皮胶原蛋白。

1.3.2 胶原蛋白的热处理以及胶原蛋白乳液的制备

用超纯水配制3 mg/mL的胶原蛋白溶液，4 ℃下搅拌过夜溶解，分别于沸水浴中加热10 min、30 min、1 h、2 h、3 h、4 h和5 h。胶原蛋白乳液的制备：使用10 mm的转子，9 000 r/min均质2 min。最终形成的乳液中，甘油三酯占水相质量的0.5%（与真实肉汤中油脂质量分数相近），吐温-20占水相质量的0.3%。样品组外水相为3 mg/mL的胶原蛋白溶液，对照组外水相为水。

1.3.3 SDS-PAGE分析

将1.3.2中经过不同条件热处理后的胶原蛋白溶液以及未经热加工的胶原蛋白原液稀释至1 mg/mL，与还原性样品处理液按体积比1∶1混合后，于沸水浴中处理5 min。之后进行SDS-PAGE分析，使用质量分数7.5%的分离胶和5.0%的浓缩胶，电压120 V，电泳时间90~120 min。

非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳（Native-PAGE）操作步骤和凝胶配方与SDS-PAGE过程一致，只是样品处理液和电泳缓冲液不加SDS和β-巯基乙醇。

1.3.4 胶原蛋白及乳液粒径的测定

1）胶原蛋白粒径的测定：用纳米粒度电位仪测定胶原蛋白样品的粒径和Zeta电位，样品平衡时间2 min，测定温度25 ℃，平行测量3次。

2）胶原蛋白乳液粒径的测定：用激光粒度分析仪测定乳液平均粒径，分散相和分散介质的折射率分别为1.45和1.33，遮光率设定为5%~10%，平行测量3次，记录Dv（10）、Dv（50）、Dv（90）、D[3,2]和D[4,3]的结果并分析。Dv（10）、Dv（50）、Dv（90）表示不同乳液粒径分布情况，D[3,2]表示乳液表面积平均粒径，D[4,3]表示乳液体积平均粒径。

1.3.5 表面疏水性和溶解度的测定

表面疏水性的测定参考Dou等[25]的方法。取0、0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 mg/mL的胶原蛋白溶液各2 mL，与10 μL 8 mmol/L的ANS溶液混匀后，静置20 min。检测条件：激发波长390 nm，发射波长470 nm。以未加入ANS溶液的胶原蛋白溶液为空白，以质量浓度为横坐标、荧光强度为纵坐标绘制线性回归曲线，所得直线斜率即为胶原蛋白溶液的表面疏水性指数。溶解度的测定参考Lv等[26]的方法。各取1 mL经不同条件热处理后的胶原蛋白溶液，于4 ℃下以10 000 g离心20 min，用BCA法测定上清液中蛋白质质量浓度。溶解度的计算见式（1）。

$$R=\frac{\omega}{3}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

R——溶解度，%；

ω——上清液中蛋白质质量浓度，mg/mL。

1.3.6 CD分析

将1.3.2所得各胶原蛋白溶液稀释到0.1 mg/mL，使用光程1 mm的石英比色皿，波长检测范围190~250 nm，以50 nm/min的速度重复扫描3次。

1.3.7 CLSM分析

参考陈佳诗等[27]的方法并稍加修改。分别配制1 g/dL尼罗红溶液、1 g/dL尼罗蓝溶液后，取1 mL现制的乳液加入2种染色液各10 μL，涡旋混匀10 min。取5 μL的混合液滴加到载玻片上，从一侧缓缓盖上盖玻片。用63×油镜观察，分别用488 nm和633 nm波长的激光激发尼罗红和尼罗蓝。调节焦距至图像清晰后拍摄。

1.3.8 挥发性物质储备液的配制

将5种挥发性物质初步溶解于无水乙醇中，再用水稀释至最终质量浓度分别为：己醛8 mg/dL、壬醛6 mg/dL、2-戊基呋喃4 mg/dL、1-辛烯-3-醇2 mg/dL、2-壬酮2 mg/dL。为了确保分散均匀，稀释后需要充分振荡并超声处理30 min。

1.3.9 挥发性物质游离率的测定

挥发性物质的测定参考郭军[28]的方法并稍加修改。采用顶空固相微萃取-气质联用（SPME-GC-MS）法。SPME条件：各取2 mL的3 mg/mL胶原蛋白溶液和胶原蛋白乳液及10 μL挥发性物质储备液于15 mL的顶空瓶中，立即封盖于涡旋机上混匀30 s，在45 ℃水浴条件下用固相微萃取装置吸附30 min。GC-MS条件：色谱柱HP-5ms（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为氦气，流量0.8 mL/min，不分流；升温程序：起始温度40 °C，保持3 min；5 °C/min升温到90 °C，然后以10 °C/min的速率升温到230 °C，保持7 min；气化室温度250 °C；采用EI电离源，电子能量70 eV，离子源温度230 °C。挥发性物质游离率按式（2）计算。

$$P=\frac{A_1}{A_2}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

P——挥发性物质游离率，%；

A_1——胶原蛋白样品组各挥发性物质的峰面积；

A_2——无蛋白质对照组各挥发性物质的峰面积。

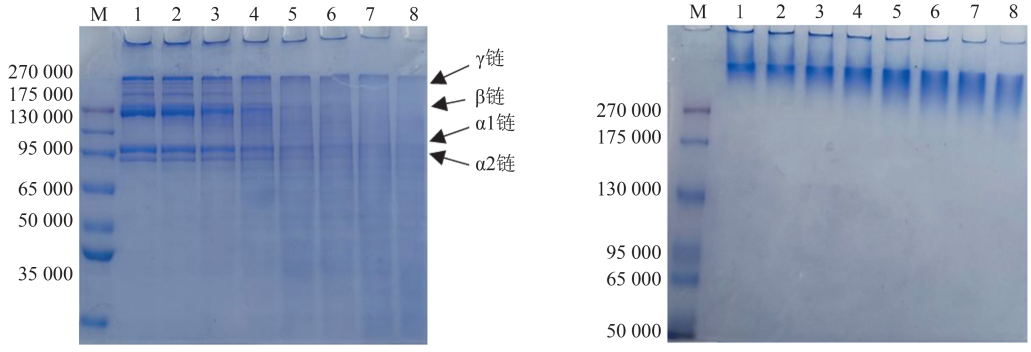
1.4　数据处理与分析

每个指标平行测定 3 次，以平均值±标准偏差表示。利用 SPSS 22 软件，使用 Duncan 法进行单因素方差分析，显著性水平设为 0.05，不同字母表示差异显著。

2　结果与讨论

2.1　电泳分析

从图 1(a)可以看出，未经加热的胶原蛋白(泳道 1)显示出 α1 和 α2 链，相对分子质量分别约为 135 000 和 125 000，同时显示出二聚体 β 链和三聚体 γ 链。且 α1 和 α2 条带强度比约为 2∶1，表明提取出的猪皮胶原蛋白具有[α1(Ⅰ)]$_2$α2(Ⅰ)的Ⅰ型胶原蛋白的典型结构[29]。当加热 10 min 时(泳道 2)，胶原蛋白的 β 链含量略有降低，表明此时胶原蛋白空间结构已遭到破坏[30]。随着加热时间进一步延长到 1 h 后，α1 和 α2 链的含量也相应降低，表明加热超过 1 h 会导致胶原蛋白多肽链的降解，产生更小的肽链。如图 1(b)所示，随着加热时间的延长，上样孔堆积的蛋白质变少，更多的蛋白质进入浓缩胶到达分离胶上端，表明加热使溶液中不溶性的蛋白质颗粒减少。



(a) SDS-PAGE　　(b) Native-PAGE

M—标准蛋白质；1—未经加热的胶原蛋白原样；2~8—加热 10 min、30 min、1 h、2 h、3 h、4 h 和 5 h 后的胶原蛋白。

图 1　加热时间对胶原蛋白降解的影响

Fig. 1　Effects of heating time on collagen degradation

2.2　胶原蛋白的二级结构

如图 2 所示，在 CD 图谱上未经加热的胶原蛋白原样在 222 nm 处显示正峰，在 198 nm 处显示负峰，证明所提取的胶原蛋白在未经加热前具有特征性三螺旋结构[31]。当进行加热后，正峰和负峰的强度都随之减弱，表明胶原蛋白逐渐发生解折叠[32]。加热 10 min 后，正峰完全消失，负峰的强度显著减小并且发生红移，表明胶原蛋白加热 10 min 后，三螺旋结构已经被破坏。此现象同样可以在 SDS-PAGE 图中得到了验证。

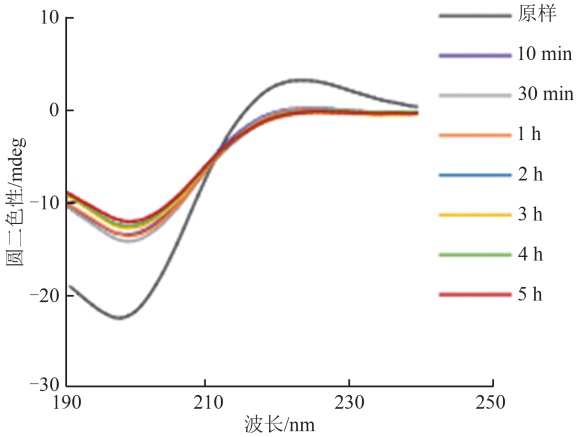


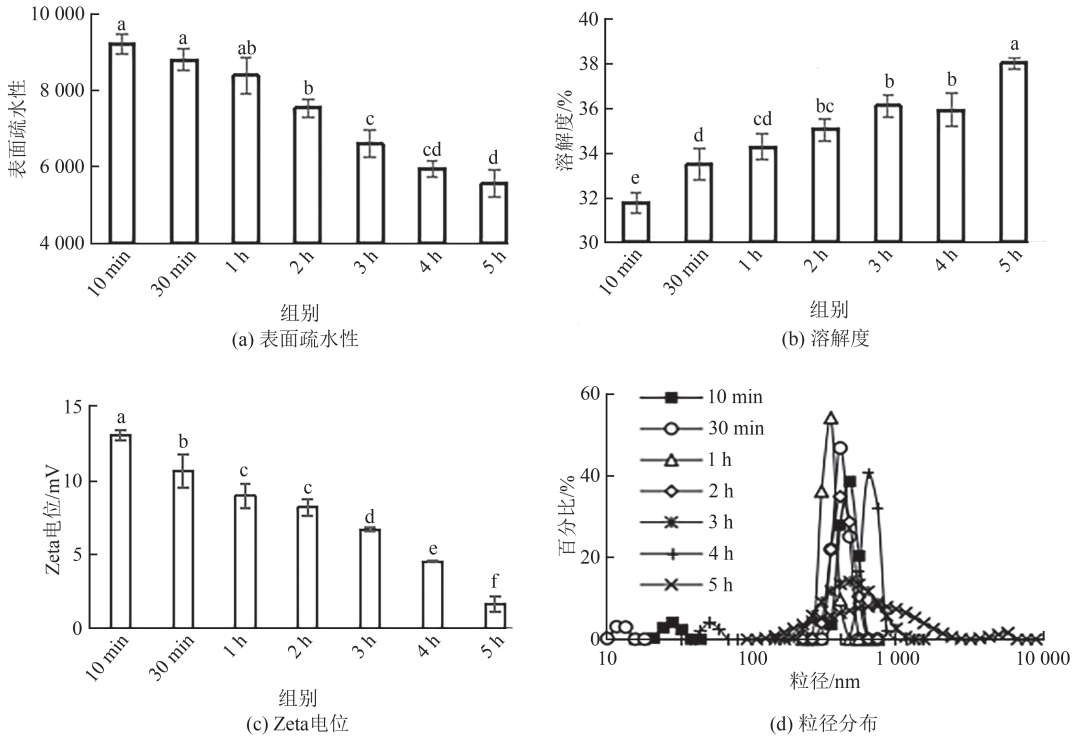
图 2　加热时间对胶原蛋白二级结构的影响

Fig. 2　Effects of heating time on collagen secondary structure

2.3　表面疏水性、溶解度和粒径

已有研究发现蛋白质的溶解度和表面疏水性呈负相关[33]。溶解度变化依赖于蛋白质亲水性和疏水性的动态平衡。如图 3 所示，胶原蛋白表面疏水性随加热时间增加而逐渐降低，而胶原蛋白的溶解度随加热时间的延长而逐渐增大。溶解度的增加和加热处理与胶原蛋白多肽链的溶出和水解

有关，从电泳图中可以观察到此现象。通过图3（d）和表1可以看出，加热时间在1 h以内时，平均粒径有减小的趋势，可能是胶原蛋白降解导致的。而继续加热后发现，平均粒径逐渐变大，5 h后平均粒径达到最大值且有更大粒径的颗粒出现。结合图3（c），表明过度加热使胶原蛋白的Zata电位降低，更易发生聚集，从而导致平均粒径的增大和表面疏水性的降低[34]。



图中不同字母代表差异显著（P<0.05）。

图3　加热时间对胶原蛋白表面疏水性、溶解度、Zeta电位、粒径分布的影响

Fig. 3　Effects of heating time on the surface hydrophobicity, solubility, particle size distribution, and Zeta potential of collagen

表1　加热时间对胶原蛋白平均粒径的影响

Table 1　Effects of heating time on the average particle size of collagen

组别	平均粒径/nm	PDI
10 min	460.40±51.09^{c}	0.63±0.06^{b}
30 min	422.93±25.13^{c}	0.55±0.09^{b}
1 h	348.99±23.07^{c}	0.54±0.04^{b}
2 h	436.84±40.27^{c}	0.54±0.07^{b}
3 h	421.63±13.40^{c}	0.41±0.04^{c}
4 h	685.89±28.89^{b}	0.41±0.06^{c}
5 h	1 043.61±180.84^{a}	0.75±0.04^{a}

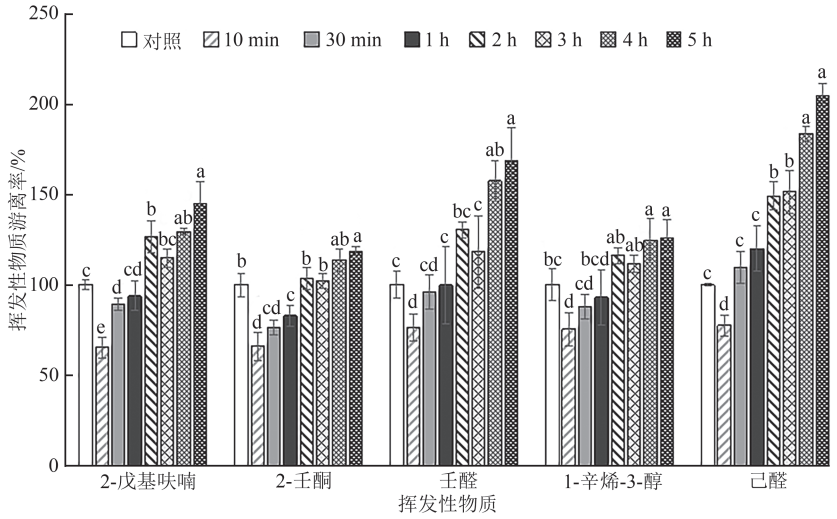
注：同一列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.4　加热时间对胶原蛋白与挥发性物质游离率的影响

2.4.1　加热时间对挥发性物质游离率的影响

加热时间对胶原蛋白水溶液中挥发性物质游离率的影响见图4。当加热时间为10 min时，己醛、2-戊基呋喃、2-壬酮、壬醛和1-辛烯-3-醇的游离率都小于100%，表明此加热条件下，胶原蛋白溶液对这5种挥发性物质都有明显的结合作用。这是因为加热10 min时，胶原蛋白具有较高的表面疏水性，从而具有较高的结合挥发性物质的能力。当加热30 min时，胶原蛋白溶液仅对2-戊基呋喃和2-壬酮有显著的保留作用，可能是因为2-戊基呋喃和2-壬酮具有相对较高的油水分配系数（lg P）[35-36]（见表2），疏水性相对较高[37]，所以更易与胶原蛋白结合。随着加热时间进一步延长，这5种挥发性物质的游离率进一步增加，与已有研究得到的蛋白质表面疏水性与风味物质游离率呈负相关[21]的结论一致。

当加热时间延长到4 h时，5种挥发性物质的游离率都超出了对照组（100%）。表明加热时间达到4 h后，胶原蛋白溶液对5种挥发性物质不再具有保留作用，反而还会促进挥发性物



图中不同字母代表差异显著（P<0.05）。

图 4　加热时间对胶原蛋白溶液中挥发性物质游离率的影响

Fig. 4　Effects of heating time on the release rate of volatile compounds from the aqueous solution of collagen

表 2　挥发性物质的 lg P

Table 2　lg P of volatile compounds

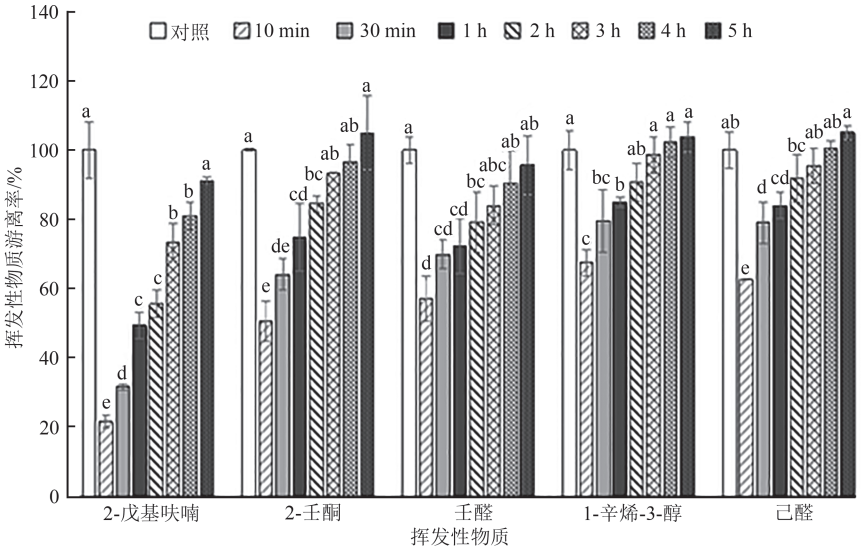
挥发性物质	lg P
2-戊基呋喃	3.76
2-壬酮	3.40
壬醛	3.16
1-辛烯-3-醇	2.50
己醛	1.78

质的释放。研究发现，在一定的条件下，蛋白质的存在会导致挥发性物质的过量逸出而不是保留，如高浓度的 G-肌动蛋白反而会促进己醛、甲硫基丙醛和辛醛的逸出[38]，导致这种现象的原因可能是：蛋白质的介入使液体的表面张力降低，从而促进挥发性物质向气相中扩散；在高蛋白质浓度下，蛋白质间相互作用的存在导致蛋白质-配体相互作用减弱。已有研究表明，随着胶原蛋白浓度的增大，溶液的表面张力会随之减小[39]。因此，胶原蛋白与挥发性物质的结合能力随加热时间的延长而逐渐减弱，并且 4 h 后促进挥发性物质释放的原因可能是：随着加热时间的延长，胶原蛋白之间聚集，导致胶原蛋白-挥发性物质作用减弱；另外，胶原蛋白的表面疏水性逐渐降低，进而对挥发性物质的结合能力减弱，并且随着胶原蛋白溶解度的增加会导致液体的表面张力降低，使挥发性物质更容易向气相中扩散。

2.4.2　加热时间对胶原蛋白乳液中挥发性物质游离率的影响

如图 5 所示，加热 10 min 时的胶原蛋白乳液中，5 种挥发性物质的游离率分别为 21%、51%、57%、67%、63%，均低于对照组，表明在短时间加热的情况下，胶原蛋白与甘油三酯在结合挥发性物质上存在协同作用，即吸附在油水界面上的蛋白质可以作为减缓挥发性物质分子传质的屏障，使释放速率降低[40]。随着加热时间的延长，胶原蛋白乳液结合挥发性物质的能力逐渐降低，与胶原蛋白溶液所表现出的趋势相似，表明即使在乳液体系中，胶原蛋白自身性质的差异仍然会显著影响对挥发性物质的结合能力。但与胶原蛋白溶液不同的是，即使加热 4 h，胶原蛋白乳液中挥发性物质的游离率也没有超过 100%，表明甘油三酯的加入可以减弱胶原蛋白过度加热带来的不利影响。

研究表明，影响挥发性物质从乳液中逸出的因素有多种，如乳液稳定性、黏度和 pH 等，但乳液的液滴特性是影响较大的因素之一[41]，因此对乳液的粒径进行表征有助于解释不同的乳液对挥发性物质结合能力的差异。如图 6 所示，胶原蛋白吸附在液滴周围，且随着加热时间的延长，乳液液滴附近分布的蛋白质逐渐增多，乳液液滴逐渐变小。对乳液液滴粒径进一步分析，结果如表 3 所示，无胶原蛋白的对照组液滴粒径最小，有胶原蛋白的样品组粒径均显著大于对照组，其中加热时间为



图中不同字母代表同种物质之间差异显著（$P<0.05$）。

图 5　加热时间对胶原蛋白乳液中挥发性物质游离率的影响

Fig. 5　Effects of heating time on the release rate of volatile compounds from collagen emulsion

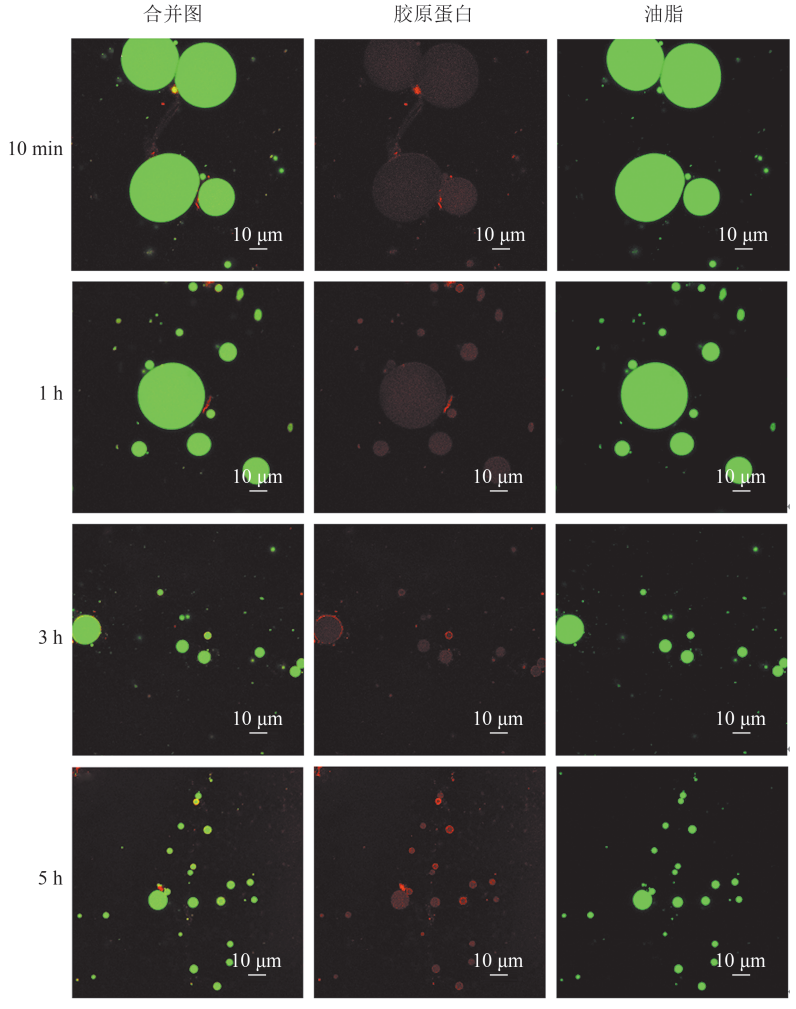


图 6　不同加热时间下胶原蛋白乳液的 CLSM 图像

Fig. 6　Heating time on CLSM images of collagen emulsion at different heating time

表 3 加热时间对胶原蛋白乳液粒径的影响

Table 3 Effects of heating time on droplet size of collagen emulsion 单位：μm

组别	*D*v(10)	*D*v(50)	*D*v(90)	*D*[3,2]	*D*[4,3]
对照	0.038±0.001^{d}	1.135±0.012^{e}	6.953±0.064^{e}	0.125±0.001^{f}	2.600±0.044^{e}
10 min	5.493±0.491^{a}	24.367±0.723^{a}	78.333±3.786^{a}	8.693±0.414^{a}	27.500±0.529^{a}
30 min	1.223±0.029^{b}	15.300±0.721^{b}	61.767±3.647^{b}	4.870±0.036^{b}	17.400±1.345^{b}
1 h	0.892±0.038^{c}	5.433±0.306^{c}	21.633±2.768^{c}	2.496±0.068^{c}	10.433±0.902^{c}
2 h	0.493±0.007^{c}	3.367±0.076^{d}	16.750±0.603^{d}	1.423±0.025^{d}	6.123±0.144^{d}
3 h	0.589±0.050^{c}	3.227±0.076^{d}	15.867±0.404^{d}	1.573±0.110^{d}	6.160±0.111^{d}
4 h	0.578±0.024^{c}	3.160±0.031^{d}	15.150±0.289^{d}	1.500±0.050^{d}	6.147±0.164^{d}
5 h	0.370±0.008^{c}	2.810±0.026^{d}	13.100±0.200^{d}	1.050±0.020^{e}	5.187±0.076^{d}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

10 min时粒径最大，并且随着加热时间延长而逐渐减小。乳液液滴越小，挥发性物质从液滴中心到界面的路径越短，挥发性物质向气相扩散的速度就越快[42]。因此，胶原蛋白乳液体系中对挥发性物质具有更强保留作用的原因是，胶原蛋白自身对挥发性物质具有结合作用，同时胶原蛋白的介入使乳液液滴增大，从而降低了挥发性物质的扩散速度。

3 结论

作者首先对不同加热时间的I型胶原蛋白自身性质进行探究，发现随着加热时间的延长，胶原蛋白的三螺旋结构先被快速破坏，然后是多肽链的断裂、溶解度的升高、表面疏水性的降低以及胶原蛋白的热聚集。进一步对胶原蛋白加热后与挥发性物质的结合能力进行研究，在水溶液体系中，胶原蛋白对挥发性物质的结合能力随着加热时间的延长而降低，与表面疏水性呈正相关。但加热4 h时反而会促进挥发性物质释放，可能是由于热聚集导致的胶原蛋白-挥发性物质相互作用的减弱以及溶液表面张力的降低。而在乳液体系中，胶原蛋白对挥发性物质表现出更高的结合能力，这是因为除了胶原蛋白自身对挥发性物质的结合作用外，胶原蛋白的加入会使形成的乳液液滴更大，进而使挥发性物质的逸出速度减慢，并且油脂的存在可以屏蔽长时间加热导致的胶原蛋白的促释效应。综上所述，胶原蛋白在短时加热以及有油脂共同存在的情况下，可以对挥发性物质展现出最强的结合能力。该研究有助于更好地理解肉汤煮制过程中胶原蛋白对挥发性物质的结合途径，对肉汤制作工艺优化提供参考。

参考文献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计，2022(3)：9-26.
National Bureau of Statistics. Statistical communiqué on national economic and social development of people's republic of China (PRC) in 2021[J]. China Statistics, 2022(3):9-26.(in Chinese)

[2] 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(1):36.

[3] 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.

[4] 关海宁，徐筱君，孙薇婷，等. 肉汤中特征风味体系的形成机理及分析方法研究进展[J]. 肉类研究，2021，35(1)：66-73.
GUAN H N, XU X J, SUN W T, et al. Recent progress in the formation mechanism and analytical methods for characteristic flavor compounds in broth [J]. Meat Research, 2021, 35(1):66-73.(in Chinese)

[5] 张慢. 清炖型肉汤的风味形成机制及电炖锅烹饪程序优化[D]. 无锡：江南大学，2019.

[6] 袁华根. 鸡肉汤香味成分鉴定及日龄、性别和酮体部位对鸡肉风味的影响[D]. 南京：南京农业大学，2007.

[7] QI J, XU Y, ZHANG W W, et al. Short-term frozen storage of raw chicken meat improves its flavor traits upon stewing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142:111029.

[8] WANG K, ARNTFIELD S D. Binding of selected volatile flavour mixture to salt-extracted canola and pea proteins and effect of heat treatment on flavour binding[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43:410-417.

[9] YANG Q L, LOU X W, WANG Y, et al. Effect of pH on

the interaction of volatile compounds with the myofibrillar proteins of duck meat[J]. Poultry Science，2017，96(6)：1963-1969.

[10] HE Y J，ZHOU C Y，LI C B，et al. Effect of incubation temperature on the binding capacity of flavor compounds to myosin[J]. Food Chemistry，2021，346：128976.

[11] XU Y X，WANG R，ZHAO H L，et al. Binding of aldehydes to myofibrillar proteins as affected by two-step heat treatments[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2020，100(3)：1195-1203.

[12] 楼宵玮，蒋娅婷，潘道东，等. 氯化钠对肌原纤维蛋白与风味物质相互作用的影响[J]. 食品科学，2017，38(5)：74-79.
LOU X W，JIANG Y T，PAN D D，et al. Effect of NaCl on the interaction of flavor compounds with myofibrillar proteins[J]. Food Science，2017，38(5)：74-79.(in Chinese)

[13] WANG K，ARNTFIELD S D. Effect of salts and pH on selected ketone flavours binding to salt-extracted pea proteins：the role of non-covalent forces[J]. Food Research International，2015，77：1-9.

[14] ZHOU F B，ZHAO M M，SU G W，et al. Binding of aroma compounds with myofibrillar proteins modified by a hydroxyl-radical-induced oxidative system[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2014，62(39)：9544-9552.

[15] SHEN H，STEPHEN ELMORE J，ZHAO M M，et al. Effect of oxidation on the gel properties of porcine myofibrillar proteins and their binding abilities with selected flavour compounds[J]. Food Chemistry，2020，329：127032.

[16] HAN Z，CAI M J，CHENG J H，et al. Effects of constant power microwave on the adsorption behaviour of myofibril protein to aldehyde flavour compounds[J]. Food Chemistry，2021，336：127728.

[17] SHOULDERS M D，RAINES R T. Collagen structure and stability[J]. Annual Review of Biochemistry，2009，78：929-958.

[18] BHUIMBAR M V，BHAGWAT P K，DANDGE P B. Extraction and characterization of acid soluble collagen from fish waste：development of collagen-chitosan blend as food packaging film[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2019，7(2)：102983.

[19] ZHANG M，ZHAO D，ZHU S R，et al. Overheating induced structural changes of type I collagen and impaired the protein digestibility[J]. Food Research International，2020，134：109225.

[20] QI J，ZHANG W W，FENG X C，et al. Thermal degradation of gelatin enhances its ability to bind aroma compounds：investigation of underlying mechanisms[J]. Food Hydrocolloids，2018，83：497-510.

[21] HAN Z，CAI M J，CHENG J H，et al. Effects of microwave and water bath heating on the interactions between myofibrillar protein from beef and ketone flavour compounds[J]. International Journal of Food Science & Technology，2019，54(5)：1787-1793.

[22] 徐思佳，毕爽，张文涛，等. 热处理对豌豆分离蛋白结合典型牛肉香气物质的影响及相互作用机制[J]. 食品科学，2022，43(19)：28-35.
XU S J，BI S，ZHANG W T，et al. Effect of heat treatment on the binding of pea protein isolate to typical beef aroma substances and their interaction mechanism[J]. Food Science，2022，43(19)：28-35.(in Chinese)

[23] GUO J，HE Z Y，WU S F，et al. Binding of aroma compounds with soy protein isolate in aqueous model：effect of preheat treatment of soy protein isolate[J]. Food Chemistry，2019，290：16-23.

[24] 叶韬，林琳，张晓霞，等. 罗非鱼骨胶原蛋白质的提取及其性质[J]. 食品与生物技术学报，2015，34(3)：302-310.
YE T，LIN L，ZHANG X X，et al. Extraction and characterization of collagen from tilapia bone[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2015，34(3)：302-310.(in Chinese)

[25] DOU P P，FENG X C，CHENG X G，et al. Binding of aldehyde flavour compounds to beef myofibrillar proteins and the effect of nonenzymatic glycation with glucose and glucosamine[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，144：111198.

[26] LV T，WANG Y，PAN D D，et al. Effect of trypsin treatments on the structure and binding capacity of volatile compounds of myosin[J]. Food Chemistry，2017，214：710-716.

[27] 陈佳诗，张利平，王旭峰，等. pH条件对肌原纤维蛋白乳液微凝胶性质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(12)：58-67.
CHEN J S，ZHANG L P，WANG X F，et al. Properties of myofibrillar protein emulsion microgels：effect of pH[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(12)：58-67.(in Chinese)

[28] 郭军. 大豆分离蛋白与水果风味化合物相互作用影响因素研究[D]. 无锡：江南大学，2021.

[29] SONG Z L，LIU H M，CHEN L W，et al. Characterization and comparison of collagen extracted from the skin of the Nile tilapia by fermentation and chemical pretreatment[J]. Food Chemistry，2021，340：

128139.

[30] XU C Y, WANG Y, PAN D D, et al. Effect of cooking temperature on texture and flavour binding of braised sauce porcine skin[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(4): 1690-1702.

[31] GOPINATH A, REDDY S M M, MADHAN B, et al. Effect of aqueous ethanol on the triplehelical structure of collagen[J]. European Biophysics Journal, 2014, 43(12): 643-652.

[32] WANG Y F, WANG X F, LIN C T, et al. Heat-induced structural changes in fish muscle collagen related to texture development in fish balls: using eel ball as a study model[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(2): 329-341.

[33] LI-CHAN E, NAKAI S, WOOD D F. Hydrophobicity and solubility of meat proteins and their relationship to emulsifying properties[J]. Journal of Food Science, 1984, 49(2): 345-350.

[34] CAO J X, ZHOU C Y, WANG Y, et al. The effect of oxidation on the structure of G-actin and its binding ability with aroma compounds in carp grass skeletal muscle[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 346-353.

[35] WILLIAM M H. CRC handbook of chemistry and physics[M]. Boca Raton: Taylor and Francis: CRC Press, 2016.

[36] PHAN V A, LIAO Y C, ANTILLE N, et al. Delayed volatile compound release properties of self-assembly structures in emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(3): 1072-1077.

[37] LANDY P, POLLIEN P, RYTZ A, et al. Model studies on the release of aroma compounds from structured and nonstructured oil systems using proton-transfer reaction mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(5): 1915-1922.

[38] PÉREZ-JUAN M, FLORES M, TOLDRÁ F. Binding of aroma compounds by isolated myofibrillar proteins: effect of protein concentration and conformation[J]. Food Chemistry, 2007, 105(3): 932-939.

[39] KEZWON A, WOJCIECHOWSKI K. Effect of temperature on surface tension and surface dilational rheology of type I collagen[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 460: 168-175.

[40] 陈臣,周琪琪,于海燕,等. 蛋白质-香气化合物结合作用的研究方法及影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 178-187.
CHEN C, ZHOU Q Q, YU H Y, et al. Research progress on determination methods and influential factors of protein-aroma compound binding[J]. Food Science, 2023, 44(17): 178-187.(in Chinese)

[41] DOI T, WANG M Q, MCCLEMENTS D J. Emulsion-based control of flavor release profiles: impact of oil droplet characteristics on garlic aroma release during simulated cooking[J]. Food Research International, 2019, 116: 1-11.

[42] MAO L K, ROOS Y H, BILIADERIS C G, et al. Food emulsions as delivery systems for flavor compounds: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(15): 3173-3187.

（责任编辑：史润东东）