

基于原料种类差异的淡水鱼鱼糜水凝胶比较分析

应月¹, 于加美², 朱杰², 刘宇佳^{2*}

(1. 湖北三峡职业技术学院农学院, 湖北宜昌 443000) (2. 东莞理工学院化学工程与能源技术学院, 食品营养健康工程与智能化加工研究中心, 中国轻工业健康食品开发与营养调控重点实验室, 广东东莞 523808)

摘要: 该研究通过对比8种淡水鱼鱼糜产品理化以及消化性特征, 构建聚类分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)以及自组织映射网络(self-organizing maps, SOM)数学模型, 探讨了种类差异与产品特征的相互关系。结果表明, 8种鱼糜凝胶的pH在6.24~6.79之间, 且没有显著性差异, 颜色以及亨特白度不同鱼糜间差异较明显, 草鱼、青鱼和鲈鱼的凝胶强度最高(约1100 g·cm), 其中鲈鱼的胶着性、咀嚼性、弹性以及回弹性等质构性质整体优于其他种类, 草鱼和鲟鱼鱼糜凝胶由于具有较松散的结构, 具有更快的蛋白质消化率, 但最终消化率趋于一致。聚类分析与PCA结果相互印证了不同种类鱼糜的从属关系, 构建14×8组特征参数为输入层, 构建竞争层为5, 输出层为25的SOM模型进一步通过拓扑结构展现了鱼糜主要特征与种类之间的内在关联。该研究旨在为我国淡水鱼鱼糜深加工提供数据参考。

关键词: 淡水鱼; 鱼糜凝胶; 理化性质; 自组织映射网络

文章篇号: 1673-9078(2021)12-162-168

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.12.0424

Comparative Analysis of Freshwater Fish Surimi Hydrogel Based on the Difference of Raw Materials

YING Yue¹, YU Jiamei², ZHU Jie², LIU Yujia^{2*}

(1. School of Agricultural, Hubei Three Gorges Polytechnic, Yichang 443000, China)

(2. School of Chemical Engineering and Energy Technology, Engineering Research Center of Health Food Design & Nutrition Regulation, Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation of China National Light Industry, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: In this study, the physicochemical and digestibility characteristics of surimi products from 8 kinds of freshwater fish were compared using constructs cluster analysis, principal component analysis (PCA) and self-organizing maps (SOM) mathematical models, and the relationship between the type of differences and product characteristics was explored. The results showed that the pH of the 8 types of surimi gels was between 6.24 and 6.79, and there was no significant difference. The color and Hunter whiteness showed obvious differences. Grass carp, black carp and striped bass had the highest gel strength (about 1100 g·cm). The texture properties of striped bass, such as adhesiveness, chewiness, spring and resilience, were overall better than other fishes. Grass carp and sturgeon surimi gels had a looser structure and faster protein digestibility, but the final digestibility of all surimi tended to be the same. Cluster analysis and PCA results confirmed the subordination of different kinds of surimi, and the constructed 14×8 sets of characteristic parameters were the input layer, and the SOM model with competition layer 5 and output layer 25 was constructed to further show the internal relationship between the main characteristics and species of surimi through the topology. This research aims to provide data reference for the deep processing of freshwater fish surimi in our country.

Key words: freshwater fish; surimi gel; physicochemical characteristics; self-organizing mapping network

引文格式:

应月,于加美,朱杰,等.基于原料种类差异的淡水鱼鱼糜水凝胶比较分析[J].现代食品科技,2021,37(12):162-168,+328

YING Yue, YU Jiamei, ZHU Jie, et al. Comparative analysis of freshwater fish surimi hydrogel based on the difference of raw materials [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 162-168, +328

收稿日期: 2021-04-18

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0400206)

作者简介: 应月(1987-),女,讲师,研究方向:食品营养与检测, E-mail: yingyue116@126.com

通讯作者: 刘宇佳(1987-),男,博士,副教授,研究方向:食品组分相互作用, E-mail: yujialiu@dgut.edu.cn

鱼糜蛋白质含量丰富、脂肪含量低、容易消化,尤其具有出色的凝胶成型性,特别适用于特殊膳食用途食品中的蛋白质类新组分^[1]。鱼糜作为鱼类深加工的主要中间产品种类,容易储存,方便运输,适合二次加工成鱼糕、鱼丸、鱼饼、鱼香肠等各类鱼糜制品,具有食用方便、营养丰富、口感层次分明的特点,深受广大消费者的喜爱^[2-3]。

我国水域辽阔,鱼类品种丰富,分布广泛。在鱼糜的生产过程中,相较于沿海地区,内陆主要以淡水鱼为加工对象。许多种类的淡水鱼,特别是塘养的中国四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼),由于含有较多的细小鱼骨,导致直接食用不便,尤其对于老年人、儿童以及具有咀嚼障碍的患者,成为阻碍特殊人群食用鱼肉的主要原因^[4]。因此,将淡水鱼加工成为鱼糜产品,不仅可以提高其使用方便性而且能提升产品价值。鱼糜凝胶的制作过程一般包含鲜鱼的预处理、清洗、脱水、加盐、擂溃以及加热成型等过程,主要成分是肌原纤维蛋白(myofibrillar protein)、肌浆蛋白(sarcoplasmic protein)和基质蛋白(matrix protein)^[5],其中肌原纤维蛋白在鱼糜形成凝胶的过程中扮演主要角色,肌原纤维蛋白主要由肌球蛋白(myosin)和肌动蛋白(actin)组成^[6],经过热处理后,蛋白结构发生改变与再组装,重新发生聚集和互联,最终形成网络结构。这些微观结构对于鱼糜凝胶产品的口感、消化性以及功能性等具有重要的决定性作用^[7]。原料鱼的种类差异,导致含有的蛋白质种类与比例都存在巨大差异,在鱼糜凝胶的形成过程中,谷氨酰胺转氨酶(transglutaminase, TGase)能够促进蛋白质中 γ -酰胺基和赖氨酸的 ϵ -氨基通过酰胺基转移反应形成异型肽键,从而促进蛋白网络结构的形成^[8],然而并不是所有鱼类中都含有内源性的TGase,这也造成了不同鱼类在相同加工工艺条件下所形成的产品品质具有明显的差异^[9]。

对比了8种淡水鱼鱼糜凝胶的色泽、质构以及消化性等主要理化性质,基于结果数据集,结合聚类分析与主成分分析(principal component analysis, PCA)方法,构建自组织映射(self-organizing maps, SOM)神经网络模型,探讨了原料种类对于鱼糜凝胶产品特征的影响关系,为淡水鱼鱼糜产品的深加工提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

市售鲜活鱼,每尾质量在0.5~1.0 kg,经鱼类专家鉴定8种鱼的科学分类(表1);胃蛋白酶(≥ 2500

units/mg),胰蛋白酶(1000~2000 units/mg)购自sigma-Aldrich 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;盐酸、氢氧化钠,三氯乙酸等试剂均为国产分析纯。

表1 淡水鱼原料种类基本信息

Table 1 Basic information of freshwater fish raw materials

编号	中文名	英文名	学名
1	草鱼	Grass carp	<i>Ctenopharyngodon idella</i>
2	鲟鱼	Sturgeon	<i>Acipenser sinensis</i>
3	鲢鱼	Silver carp	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>
4	罗非鱼	Tilapia	<i>Oreochromis mossambicus</i>
5	青鱼	Black carp	<i>Mylopharyngodon piceus</i>
6	黑鱼	Snakehead	<i>Ophiocephalus argus Cantor</i>
7	鲫鱼	Crucian carp	<i>Carassius auratus</i>
8	鲈鱼	Striped bass	<i>Lateolabrax japonicus</i>

1.2 仪器与设备

Hunter Lab 色度计(WSC-S),上海精密科学仪器有限公司;TA.XTPlus 质构分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;pH 仪,梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;磁力搅拌器,上海力辰仪器科技有限公司;多功能斩拌机,浙江苏泊尔股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼糜凝胶的制备

鲜鱼→预处理→冰水清洗→去骨→去腥(冰水,3次漂洗)→切割(5×5×5 mm³)→脱水→加盐(3%)→擂溃(20 min)→放入肠衣(内径3.0 cm)并密封

样品两段加热:40℃持续30 min,然后转至90℃持续10 min。立即将加热的样品放入冰水中冷却,4℃的冰箱中保存待分析。

1.3.2 pH 分析

将待测鱼糜凝胶1.0 g加入9 mL去离子水,使用pH计测量样品pH值。

1.3.3 颜色分析

将鱼糜凝胶平铺在测色计专用玻璃皿中,采用L*、a*和b*值用于表示样品的颜色,并通过公式1计算亨特白度(W_H)值:

$$W_H = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (1)$$

1.3.4 全质构分析(Texture Profile Analysis, TPA)

参照 Yu 等^[10]的方法,将鱼糜凝胶样品切成2.0×3.0 cm(高×直径)的圆柱体,用于测量样品的凝胶强度和TPA。凝胶强度测试条件:将鱼糜凝胶样品在25℃下平衡2 h,使用球形P/5S探针以1 mm/s的速度挤压并

刺入每个样品的表面 1.0 cm (原始高度的 50%)。TPA 测试条件: 使用圆柱形 P/50 探针, 测前, 测试速度和测后速度分别设定为 2 mm/s、1 mm/s 和 5 mm/s, 压缩比为 50%。每次测量 TPA 和凝胶强度至少重复 9 次。

1.3.5 消化性

参照 Li 等^[11]的方法测定鱼糜凝胶的体外模拟消化率。将样品(5.0 g)在 37.0 mL HCl 溶液(10 mmol/L)中以 7500 r/min 匀浆 30 s, 然后加入 8 mL 胃蛋白酶溶液(9 mg/mL 溶于 10 mmol/L HCl)。将该混合物置于 37 °C 水浴中 1 h 以模拟胃消化。此后, 使用 1 mol/L NaOH 将 pH 调节至 7.5 以使胃蛋白酶失活。然后加入相应剂量的胰蛋白酶溶液(终浓度为 4% m/m, 基于蛋白质含量, pH 7.5), 并在 37 °C 消化 2 h。将消化液样品(1.0 mL)分别置于 30、60、90、120 和 180 min 的 2 mL 塑料离心管中。随后终止酶促水解, 并用等体积的 30% 三氯乙酸溶液沉淀样品, 并将混合物在 4 °C 下放置过夜。将样品在 25 °C 下以 10000×g 离心 10 min。弃去上清液, 并向试管中加入 1 mL NaOH (1 mol/L) 以沉淀蛋白质。用缩二脲法测定蛋白质浓度。体外消化率计算如下:

$$\text{消化率}/\% = \frac{C_t - C_p}{C_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

C_t ——总蛋白质浓度;

C_p ——三氯乙酸中蛋白质的浓度。

1.3.6 数据处理与分析

使用 SPSS 17.0 软件中的单因素方差分析进行统

计, 当 $p < 0.05$ 时被认为具有显著性差异, 并用不同的字母标记; 所有数据均以含有标准偏差的平均值方式 (mean±S.D.) 表示。使用 SPSS 17.0 软件中聚类分析与因子分析模块进行样品聚类与 PCA; 使用 MATLAB R2010b 软件 Artificial neural networks 模块 SOM 方法进行自组织映射分类的数学建模。

2 结果与讨论

2.1 颜色与 pH

鱼糜水凝胶的 pH 值被认为是与新鲜度、颜色、质地和营养有关的重要质量指标之一。不同种类鱼糜水凝胶的 pH 列于表 2。结果发现, 鱼糜的种类差异对于 pH 没有显著性影响 ($p > 0.05$), 主要分布在 6.24~6.79 之间, 这表明所有样品都是新鲜的^[12], 并且在相同的条件下完成后续实验分析。

颜色和白度是体现鱼糜水凝胶品质的另一个质量指标, 直接影响消费者对鱼糜类产品的感官接受度。 L^* 与鱼糜凝胶的亮度有关, a^* 和 b^* 值分别表示红黄色和蓝绿色。结果发现, 不同种类鱼糜的颜色变化没有表现出规律性, 但是计算得出的 W_H 与 L^* 呈现相同的波动规律, 这表明 L^* 可能是影响 W_H 的主要原因。鱼糜凝胶的 W_H 通常在 55~75 之间^[13], 这与本实验结果一致。在鱼糜加工工艺中, 虽然由于盐诱导溶解出盐溶性蛋白, 释放出肌红蛋白和色素, 在洗涤过程中被除去^[14], 从而表现出鱼肉白皙的特点。但是鱼的类型差异仍然是影响鱼糜凝胶颜色和 W_H 的主要因素。

表 2 不同种类鱼糜水凝胶的 pH 以及颜色差异

Table 2 The differences of pH and color from different types of surimi hydrogels

种类	pH	L^*	a^*	b^*	W_H
草鱼	6.67±0.01 ^a	68.70±1.34 ^c	-0.33±0.01 ^a	15.32±0.89 ^a	65.15±2.11 ^e
鲟鱼	6.79±0.02 ^a	69.21±1.66 ^c	-1.19±0.02 ^b	12.39±0.83 ^d	66.79±2.58 ^d
鲢鱼	6.45±0.01 ^a	77.37±2.64 ^a	-1.97±0.02 ^c	13.14±0.57 ^c	73.75±3.15 ^a
罗非鱼	6.68±0.02 ^a	66.65±2.01 ^d	-2.62±0.03 ^d	9.94±0.34 ^f	65.09±2.94 ^e
青鱼	6.43±0.01 ^a	74.62±3.12 ^b	-3.50±0.01 ^e	14.30±0.29 ^b	70.68±3.62 ^b
黑鱼	6.24±0.01 ^a	69.61±1.95 ^c	-0.20±0.02 ^a	9.20±0.65 ^f	68.19±1.86 ^c
鲫鱼	6.68±0.02 ^a	78.90±0.95 ^a	-0.89±0.01 ^a	14.89±0.98 ^b	74.16±0.88 ^a
鲈鱼	6.52±0.01 ^a	73.81±2.38 ^b	-3.60±0.05 ^e	11.10±0.44 ^e	71.28±3.06 ^b

注: 每一列不同字母表示具有显著性差异 ($p=0.05$)。

2.2 质构分析与凝胶强度

TPA 用于确定鱼糜凝胶的质构信息, 包括硬度, 胶着性, 咀嚼性、黏性、弹性以及回弹性, 结果如图 1 所示。这些参数定量表征了鱼糜凝胶的产品质量, 其中硬度主要针对牙齿压入鱼糜凝胶表面的抵抗能力

^[15], 这对儿童, 老人和某些咀嚼障碍者非常重要。从图 1a 可以看出, 鲈鱼鱼糜凝胶的硬度最高为 8566.02 N, 是最低种类鲢鱼的 3.5 倍。胶着性和咀嚼性分别显示半固体食品的崩解和咀嚼所需的能量^[16-17], 对于所有鱼糜凝胶而言, 他们与硬度的变化趋势表现出一致性。但是对于黏性、弹性以及回弹性指标而言, 确又

表现出不明显的规律。

胶凝强度是鱼糜产品质量的重要指标，直接影响到他的商业价值。通常情况下，较低的凝胶强度，鱼糜的质量较差并且口感较差。图2表明，草鱼、青鱼和鲈鱼的凝胶强度最高（约1100 g·cm），且没有显著性差异；罗非鱼鱼糜的最低（446.12 g·cm），仅为最高品类的三分之一左右。鱼糜样品的凝胶强度主要与其再水化能力有关，较高的凝胶强度值表明这种蛋白凝胶具有更高的韧性和复水能力^[18]，在鱼糜产品从冷藏到再加工的过程中，展现出更好的品质特性。鱼糜经过盐洗与擂溃工艺后，盐溶性蛋白（如肌动蛋白和肌球蛋白）充分溶解，TGase 触发了肌球蛋白重链的聚合反应，最终形成交联的蛋白质凝胶网络，这种网络结构将更多的水分子捕获到蛋白质凝胶网络的氨基酸链中^[7]，导致鱼糜的质构发生变化，而不同种类鱼的TGase 含量以及盐溶性蛋白的所占比例差异导致最终鱼糜凝胶质构的巨大差异^[19]，这可能是导致不同鱼糜凝胶质构特性的主要原因。

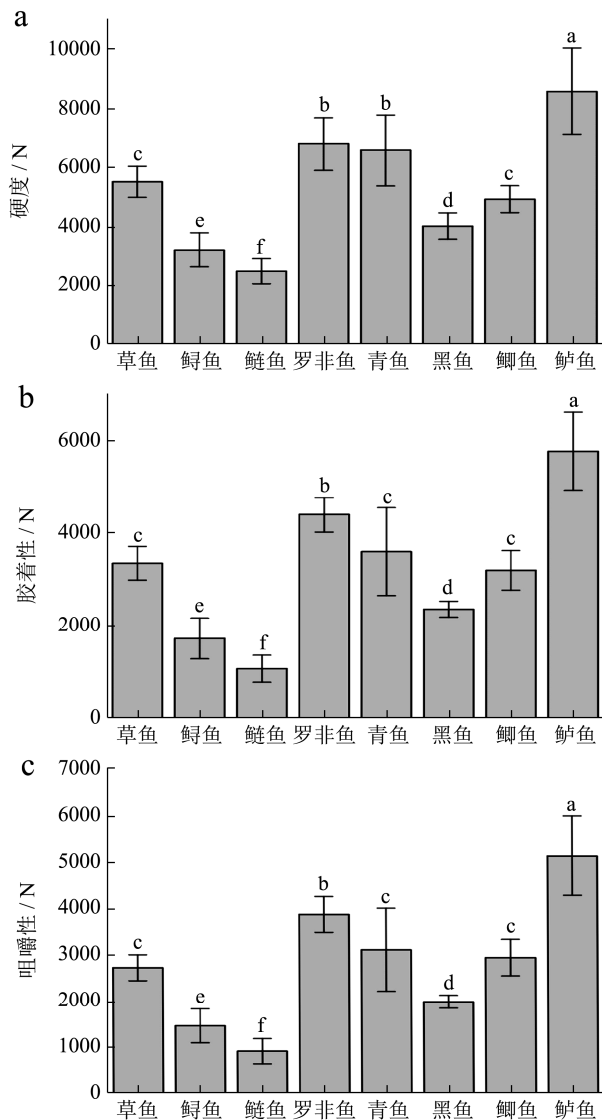


图1 鱼糜凝胶的TPA结果

Fig.1 Texture profile analysis of surimi gel

注：a：硬度；b：胶着性；c：咀嚼性；d：黏性；e：弹性；f：回弹性。图中的不同小写字母表示具有显著性差异（ $p < 0.05$ ）。下图同。

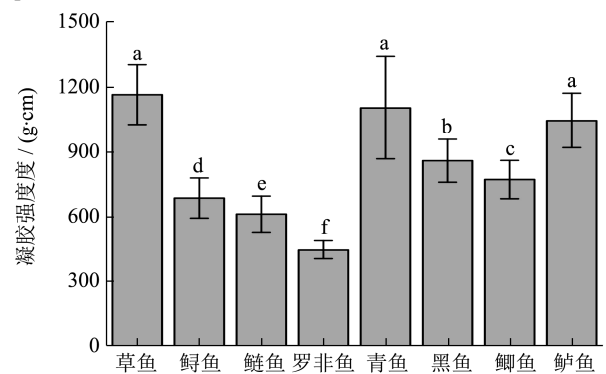


图2 不同原料种类鱼糜凝胶的凝胶强度

Fig.2 The gel strength analysis of surimi gel form different fish

2.3 蛋白质消化率

蛋白质消化率可用于评估鱼糜类食品蛋白质的营养价值^[20]。如图3所示,通过计算样品在模拟胃液和肠液中的体外消化率,对比不同种类鱼糜的蛋白质凝胶消化情况。在最初的30 min内,主要在模拟胃液体系中,不同种类鱼糜凝胶既表现出明显的差异性,其中鲟鱼的消化率最高,达到74.58%,草鱼和青鱼依次为67.97%和54.62%,而其它5种鱼糜凝胶在44%~48%之间($p < 0.05$)。不同鱼糜种类的肌球蛋白与肌动蛋白含量与比例都不尽相同,在模拟胃液中展开的氨基酸链结构与数量导致与胃蛋白酶的结合位点也存在差异性,因此表现出较大的初试消化率^[11]。随后,通过将pH调节至7.5以使胃蛋白酶失活,使用胰蛋白酶进行肠液的消化实验,各种鱼糜凝胶蛋白的消化率差异逐渐减少,在消化180 min后,消化率范围在84.66%到96.16%之间,不同种类鱼糜蛋白质组成以及TGase的含量都是影响蛋白质早期消化的重要因素^[21-22],这也导致了不同鱼糜凝胶呈现出消化差异性。在经过180 min的模拟消化过程后最终消化率逐渐接近,除了草鱼和鲟鱼具有较高的消化率外,其它6种鱼糜凝胶的消化率已经不存在统计学差异($p > 0.05$),这表明消化过程已经完成。

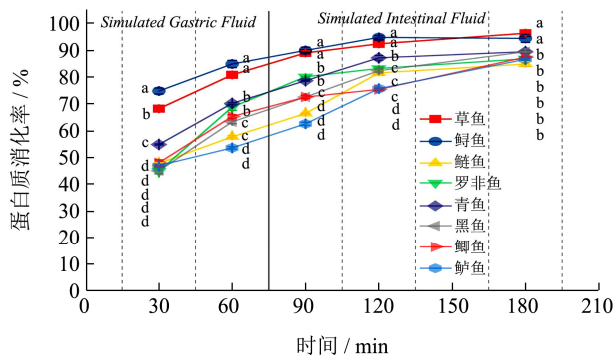


图3 不同种类鱼糜的蛋白质消化率

Fig.3 Protein digestibility of different types of surimi

2.4 聚类分析与主成分分析

为了深入研究原料种类差异与鱼糜凝胶产品品质的内在关联,通过数据降维的思路,以不同种类鱼糜产品的色泽、质构以及消化性特征数据为基础,使用聚类分析方法映射到一维坐标系。图4a为聚类分析结果,清晰展示了不同种类鱼糜凝胶的相关性,其中鲫鱼、鲈鱼和罗非鱼聚类为一组,其它5种鱼聚类为一组,但是聚类分析主要从一维角度体现各研究对象的从属关系,在阐明各个研究对象相关性层级方面则表现出不足,因此进一步使用主成分分析探讨他们的相关性距离。

以不同鱼糜种类差异的14×8维数据作为分析特征值,使用主成分分析方法,提取10主成分,其中第1主成分和第2主成分对产品特征的累积方差贡献率达99.70%,说明前2个主成分可以有效呈现研究对象的特征情况。通过相关性矩阵结果(表3),展现了任何2种鱼糜产品之间的相关关系,其中数值在0.8以上认为是高度相关关系,0.5~0.8是中度相关关系,0.3~0.5是低度相关性,小于0.3不相关。为了更为直观的观察不同鱼糜的相互关系,将2个主成分映射到二维坐标系,结果如图4b所示。其中,草鱼与黑鱼特征点最接近,表明这2种鱼类的产品在综合特征方面更为相似;鲫鱼、鲈鱼以及罗非鱼特征点都处于第一象限体现了他们特征的一致性,鲢鱼、青鱼和鲟鱼特征点与其它点相对独立,同时整体观察到除青鱼外,其它特征点都远离0点,表明通过主成分分析方法研究对象所得到的特征性明显,具有良好的区分度^[23]。

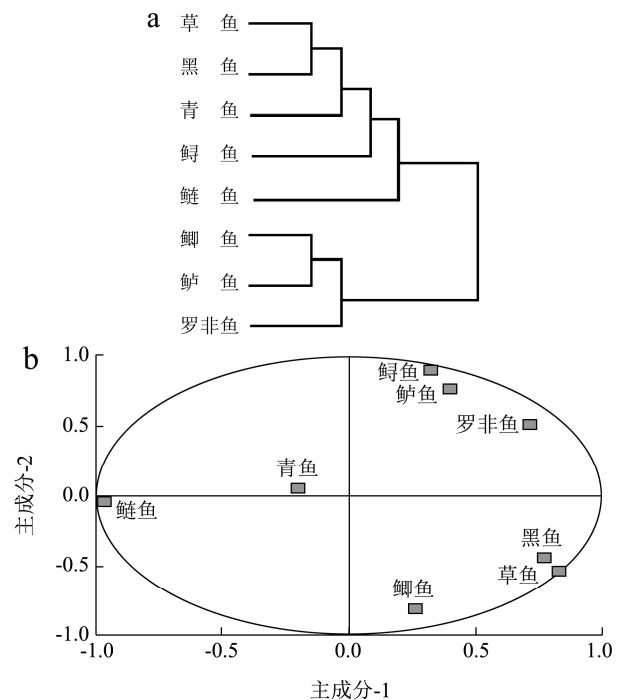


图4 聚类分析与主成分分析

Fig.4 Cluster analysis and principal component analysis

主成分分析是一种将高维度数据集转换为低纬度统计量的数学方法,当输入数据集的特征值数量级差异较大时,则会使结果偏向于主要依靠数量级大的一组或几组特征值,从而出现提取特征能力偏颇的不足,单纯的使用归一化方法又会削弱特征数据的权重^[24]。食品体系是一个集合质构、色泽、气味、风味以及营养、功能等多维度的复杂体系,因此主成分分析方法对食品复杂体系的多种类型特征值抓取与分类具有局限性^[25],需结合其他数学方法探讨他们的内在关系。

表 3 不同种类鱼糜水凝胶的相关性矩阵

Table 3 The correlation matrix from different types of surimi hydrogels

种类	草鱼	鲟鱼	鲢鱼	罗非鱼	青鱼	黑鱼	鲫鱼	鲈鱼
草鱼	1.00							
鲟鱼	0.45	1.00						
鲢鱼	-0.07	-0.06	1.00					
罗非鱼	-0.16	-0.66	-0.28	1.00				
青鱼	-0.36	-0.34	0.20	0.35	1.00			
黑鱼	0.79	0.38	0.08	-0.13	-0.61	1.00		
鲫鱼	-0.52	-0.69	-0.07	0.32	-0.28	0.63	1.00	
鲈鱼	-0.04	-0.75	-0.31	0.84	0.65	-0.21	0.28	1.00

2.5 SOM 神经网络

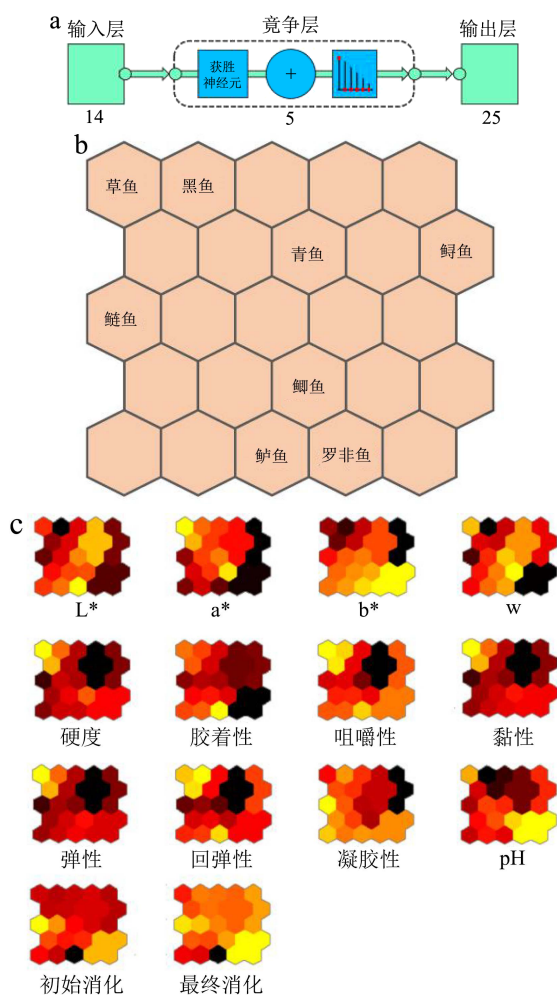


图 5 SOM 神经网络模型

Fig.5 Self-organizing maps neural network model

本研究进一步采用非线性无目标自主学习的 SOM 模型，通过构建多层神经网络模型，提取与分析样本特征属性，对其进行自主分类，从而展现研究目标的内在关联规律。SOM 算法因其通过对特征值的主动捕捉与自主学习，结果与特征值的初试状态无关，能够在多层分类后仍然保持拓扑结构，因此特别适用

于具有多维度特点的复杂食品体系。本研究以颜色、pH、质构以及消化性等 14×8 组特征参数为输入层，构建竞争层为 5，输出层为 25 的自组织神经网络（图 5a），经过 train（训练函数）和 sim（仿真函数）在输出误差小于收敛临界值时完成训练，最终形成单一获胜神经元的拓扑网络结构。图 5b 展示了不同种类鱼糜凝胶经 SOM 网络拓扑分类后的空间定位，可以发现草鱼和黑鱼主要分布在左上位置，鲫鱼、鲈鱼和罗非鱼集中在空间的中下部分，其它 3 种鱼类相对独立分布在不同位置，结果进一步通过无规律特征数据揭示了这 8 种鱼糜凝胶的内在关联。同时，图 5c 展示了各特征值对于拓扑分类结果的贡献，颜色越深表明该特征值对此位点贡献越多。鱼肉中含有丰富的优质蛋白质，在鱼肉深加工过程中，所采取的鱼糜材料种类来源是多样的，一方面由于塘养淡水鱼通常含有较多的小鱼骨，不便于老人、儿童等特殊人群的直接食用从而用于深加工；另一方面沿江、沿海地区捕获的大量野生鱼类，在无法快速销售的情况下加工成鱼糜制品便于后续的储藏与运输。使用 SOM 模型研究鱼糜种类与产品品质的内在关联，可为鱼糜制品的深加工与产品升级提供参考。

3 结论

通过对比 8 种淡水鱼鱼糜产品的颜色、质构以及蛋白消化率，结合聚类分析和 PCA 方法，构建 SOM 模型，探讨了原料种类差异与产品品质的内在关系。结果表明，8 种鱼糜凝胶的颜色具有显著性差异，草鱼、青鱼以及鲈鱼具有较好的凝胶成型性，其中鲈鱼的胶着性、咀嚼性、弹性以及回弹性等质构性质整体优于其他种类，草鱼和鲟鱼鱼糜凝胶由于具有较松散的结构，具有更快的蛋白质消化率，但最终消化率趋于一致。聚类分析与 PCA 结果相互印证了不同种类鱼糜的从属关系，SOM 模型进一步通过拓扑结构展现了鱼糜特征与种类之间的内在关联，研究结果为我国淡

水鱼鱼糜深加工提供了数据参考。

参考文献

- [1] Dankar I, Haddarah A, Omar F E, et al. 3D printing technology: the new era for food customization and elaboration [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 231-242
- [2] 顾晓慧,殷邦忠,王联珠,等.我国冷冻鱼糜生产及标准现状分析[J].食品科学,2014,35(23):303-307
GU Xiaohui, YIN Bangzhong, WANG Lianzhu, et al. Current situation of frozen surimi production and quality standards in China [J]. Food Science, 2014, 35(23): 303-307
- [3] 杨姣,安玥琦,陈雨欣,等.鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析[J].现代食品科技,2020,36(8):265-280
YANG Jiao, AN Yueqi, CHEN Yuxin, et al. Characterization of odorant components in surimi products with warmed-over flavor during the heating process [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 265-280
- [4] 何秋生,李向阳,方振华,等.淡水鱼的加工及综合利用初探[J].中国水产,1999,7:44-46
HE Qiusheng, LI Xiangyang, FANG Zhenhua, et al. Preliminary study on the processing and comprehensive utilization of freshwater fish [J]. Chinese Fisheries, 1999, 7: 44-46
- [5] Verbeken D, Neirinck N, Van Der Meeren P, et al. Influence of κ -carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat proteins [J]. Meat Science, 2005, 70(1): 161-166
- [6] Yongsawatdigul J, Sinsuwan S. Aggregation and conformational changes of tilapia actomyosin as affected by calcium ion during setting [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(3): 359-367
- [7] 于加美,高瑞昌,石彤,等.高脱乙酰度魔芋葡甘聚糖对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J].现代食品科技,2019,35(8):48-54
YU Jiamei, GAO Ruichang, SHI Tong, et al. Effects of konjac glucomannan with a high degree of deacetylation on the gelling properties of silver carp surimi [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(8): 48-54
- [8] Mengxue F, Shanbai X, Yue J, et al. *In vitro* pepsin digestion characteristics of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels with different degrees of cross-linking induced by setting time and microbial transglutaminase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(31): 8413-8430
- [9] 张梦玲,张晋,熊善柏,等.转谷氨酰胺酶及其在鱼糜制品加工中的应用[J].食品研究与开发,2016,37(24):190-195
ZHANG Mengling, ZHANG Jin, XIONG Shanbai, et al. Transglutaminase and its application in processing of surimi product [J]. Food Research and Development, 2016, 37(24): 190-195
- [10] Yu N, Xu Y, Jiang Q, et al. Molecular forces involved in heat-induced freshwater surimi gel: effects of various bond disrupting agents on the gel properties and protein conformation changes [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 193-201
- [11] Li Y, Xiong S, Yin T, et al. The gastric digestion kinetics of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels induced by transglutaminase [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 148-154
- [12] 徐莉娜,贺海翔,罗煜,等.鱼糜 pH-shifting 工艺及其胶凝机制研究综述及展望[J].食品工业科技,2018,39(11):301-306
XU Lina, HE Haixiang, LUO Yu, et al. The pH-shifting technology for surimi and its gelation mechanism review and prospect [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(11): 301-306
- [13] Zhang L, Li Q, Shi J, et al. Changes in chemical interactions and gel properties of heat-induced surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during setting and heating: effects of different washing solutions [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 116-124
- [14] Benjakul S, Visessanguan W, Pecharat S. Suwari gel properties as affected by transglutaminase activator and inhibitors [J]. Food Chemistry, 2004, 85(1): 91-99
- [15] Li Y, Xiong S, Yin T, et al. The gastric digestion kinetics of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels induced by transglutaminase [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 148-154
- [16] Farahnaky A, Azizi R, Majzoubi M, et al. Using power ultrasound for cold gelation of kappa-carrageenan in presence of sodium ions [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 173-181
- [17] Phimolsiripol Y, Siripatrawan U, Henry C J K. Pasting behaviour, textural properties and freeze-thaw stability of wheat flour-crude malva nut (*Scaphiumscaphigerum*) gum system [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(3): 557-562
- [18] Yuan L, Yu J, Mu J, et al. Effects of deacetylation of konjac glucomannan on the physico-chemical properties of surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. RSC Advances, 2019, 9(34): 19828-19836

(下转第 328 页)