DOI:10.12441/spyswjs.20231205002 [文章编号] 1673-1689(2025)02-0001-11

多酚对鱼糜凝胶特性影响的研究进展

田 方[1,2] 陈文宇初[1,2] 管维良[3] 蔡路昀[1] 张滋慧[4] 张崇生[5*] 倪 赞[5]
陈祜福[6] 黄旭辉[7]

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,浙江 杭州 310058; 2. 浙江海洋大学食品科学与药学学院,浙江 舟山 316022; 3. 广西大学轻工与食品工程学院,广西 南宁 530004; 4. 赤峰市农牧业综合检验检测中心,内蒙古 赤峰 024005; 5. 温州市食品药品检验科学研究院,浙江 温州 325038; 6. 浙江香海食品股份有限公司,浙江 温州 325299; 7. 温州市强能食品有限公司,浙江 温州 325015)

摘要:鱼糜在生产、贮藏及运输过程中易受到外界因素(温度、氧化、微生物等)的影响,导致其凝胶特性下降,进而降低鱼糜品质。凝胶特性受原料鱼种类、漂洗方式、加热方式和外源添加剂种类等多种因素影响,是评价鱼糜品质的一项重要指标,也是决定消费者购买意愿的主要因素。多酚是一类含有多个酚羟基的化合物,可以与蛋白质相互作用,具有来源广泛和绿色安全等优点。多酚不仅可以延缓蛋白质氧化和抑制微生物生长,还能增强鱼糜的凝胶特性,从而解决因外界因素引起的品质下降问题。因此了解多酚增强鱼糜凝胶特性的作用机制并总结其研究进展十分必要。作者综述了鱼糜凝胶机制以及多酚与蛋白质的相互作用机理,探讨了不同因素对鱼糜凝胶特性和多酚与蛋白质相互作用的影响,总结了多酚用于提高鱼糜凝胶特性的应用现状,为拓宽多酚在鱼糜及其他水产品加工领域的应用提供理论依据。

关键词:多酚;鱼糜;凝胶特性

Research Progress in Effects of Polyphenols on Gel Properties of Surimi

TIAN Fang[1,2] *CHEN Wenyuchu*[1,2] *GUAN Weiliang*[3] *CAI Luyun*[1] *ZHANG Zihui*[4]
ZHANG Chongsheng[5*] *NI Zan*[5] *CHEN Hufu*[6] *HUANG Xuhui*[7]

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Food and Pharmacy College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3. School of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Comprehensive Inspection and Testing Center for Agriculture and Animal Husbandry in Chifeng City, Chifeng 024005, China; 5. Wenzhou Food and Drug Inspection Science Research Institute, Wenzhou 325038, China; 6. Zhejiang Xianghai Food Co., Ltd., Wenzhou 325299, China; 7. Wenzhou Qiangneng Food Co., Ltd., Wenzhou 325015, China)

Abstract: During the production, storage, and transportation, surimi is susceptible to external factors such as temperature, oxidation, and microorganisms. These factors can lead to the decline of gel properties, thereby affecting surimi quality. Gel properties are affected by various factors, including fish species, rinsing methods, heating methods, and exogenous additives. These properties are critical indicators of surimi quality and major factors influencing consumer purchasing decisions. Polyphenols, compounds with multiple phenolic hydroxyl groups, can interact with proteins and offer advantages such as a wide range of sources and being green and safe. Polyphenols can not only delay protein oxidation and inhibit microbial growth but also enhance the gel properties of surimi, thereby addressing the issues caused by external factors. Therefore,

基金项目:温州市重大科技项目(ZN2021002);宁波市科技计划项目(2023S235,2022S148);宁波市 3315 计划项目(2020B-34-G)。
通信作者:张崇生(1977—),男,高级工程师,主要从事食品质量安全控制研究。E-mail: 1018763742@qq.com
收稿日期:2023-12-05 **修回日期:**2024-02-21

it is essential to understand the mechanism by which polyphenols enhance the gel properties of surimi and review the research progress in this area. The gelation mechanisms of surimi and the interaction mechanisms between polyphenols and proteins were summarized, and the effects of different factors on the gel properties of surimi and the interactions between polyphenols and proteins were discussed. Furthermore, the current applications of polyphenols in improving the gel properties of surimi were reviewed, providing a theoretical basis and reference for expanding the application of polyphenols in the processing of surimi and other aquatic products.

Keywords: polyphenols; surimi; gel properties

鱼糜是指鱼经过漂洗和脱水等工艺得到的肌原纤维蛋白（MP）浓缩物，具有营养丰富、味道鲜美、食用方便等优点[1-3]。《2022 中国渔业统计年鉴》显示，我国鱼糜年产量为 134.98 万 t，与 2010 年相比增长了 69.8%，产量的增长也引发了市场规模的迅速扩大，2022 年渔业经济总产值高达 15 158.63 亿元，较 2010 年增长 155.3%，是我国水产行业中增长较快的产业之一[4]。目前鱼糜加工行业发展迅猛，但仍存在许多问题，包括鱼糜在制作过程中易被微生物污染、运输过程中稳定性差、本身抗氧化能力差等问题，这均会导致鱼糜的凝胶特性大幅降低，导致其品质劣变。因此如何提高鱼糜的凝胶特性及品质，解决制约鱼糜行业发展的问题，一直是水产加工领域的研究热点。

鱼糜的凝胶特性受原料鱼种类、漂洗方法、加热方式和外源添加剂种类等因素影响，是评价鱼糜品质的重要指标，为改善其凝胶特性，往往需要在加工过程中加入外源添加剂[5]。根据分子结构可将外源添加剂分为多糖、蛋白质和多酚等[6]。不同种类的外源添加剂对鱼糜品质的影响亦存在差异[7]。与其他添加剂相比，多酚具有抗氧化效果显著、提取工艺简便、与蛋白质结合能力强、来源广泛等特性，能有效增强鱼糜凝胶特性。

多酚是一类具有多个酚羟基的化合物，凭借其优异的抗氧化性以及独特的促进蛋白质凝胶的功能，可改善鱼糜在生产、贮藏、运输过程中的品质下降等问题[8]。在凝胶过程中多酚与蛋白质以不同的方式相互作用，该过程主要受多酚类型、反应物浓度比、pH、反应温度等因素的影响。凝胶化是蛋白质变性和聚集形成三维网状结构的过程，该结构会受分子的共价和非共价相互作用的影响。目前，多酚与蛋白质的相互作用机制分为 2 种：一种是由不可逆作用力介导的共价相互作用（自由基结合、碱处理和酶催化）；另一种是由可逆作用力介导的非共价相互作用（氢键、疏水相互作用、离子键和范德华力）[9]。尽管作用方式不同，但 2 种作用机制都会改变多酚和蛋白质的功能特性。但也有研究表明，多酚与蛋白质的相互作用会降低酚类物质的生物利用度，因此需选择适宜的多酚，以确保其与蛋白质形成复合物的凝胶特性得到显著改善[10]。近年来，关于多酚提高鱼糜抗氧化性的研究较多，但对增强其凝胶特性的研究较少。因此，作者首先对鱼糜凝胶进行了概述，并阐述了多酚改善鱼糜凝胶特性的机制，最后总结了影响鱼糜凝胶特性的因素和多酚提高鱼糜凝胶特性的应用情况，为拓宽多酚在鱼糜制品研发及其他水产品加工领域中的应用提供理论指导。

1 鱼糜凝胶概述

鱼糜中的蛋白质可分为 MP、基质蛋白以及肌浆蛋白，其中 MP 在鱼糜中的含量最高，在凝胶过程中发挥主要作用[11]。根据结构可将 MP 分为肌球蛋白、肌动蛋白、肌动球蛋白以及调节蛋白，其中肌球蛋白是 MP 的主要组成成分，由 2 个椭圆形的头部和 2 条多肽链形成的尾部组成。头部富含疏水性氨基酸，是一个 α 螺旋盘绕的线圈，外表面聚集了高密度的带电氨基酸[12]。在加热条件下，肌球蛋白变性并聚集形成三维网状结构，对凝胶的形成起着关键作用。肌动蛋白以球蛋白的形式存在于鱼糜中，其可显著影响鱼糜凝胶的微观结构和质地，并且对肌球蛋白凝胶化有促进作用[13]。在加热条件下，肌动蛋白与肌球蛋白发生相互作用，形成肌动球蛋白，它们之间的交联作用会使凝胶整体结构更加致

密，这对凝胶的形成至关重要。调节蛋白包括肌钙蛋白和原肌球蛋白，它们在调控肌动蛋白和肌球蛋白结合的过程中发挥关键作用，这些蛋白质的调节功能对凝胶的稳定性和功能特性具有重要影响[14]。

鱼糜凝胶过程包括凝胶化、凝胶劣化和鱼糕化3个过程[15]。凝胶化（见图1）发生在温度低于50 ℃的加热初期，首先由肌球蛋白通过头部之间的相互作用形成二聚物和低聚物，此时蛋白质的构象（α螺旋、β折叠以及无规卷曲）发生变化；其次，肌球蛋白在非二硫键和疏水相互作用下产生架桥的作用力，聚合成黏性很强的肌球蛋白溶胶；最后肌球蛋白溶液中的低聚物通过尾-尾交联进一步聚集成凝胶基质，凝胶基质夹带水并固定肌球蛋白包裹的脂肪颗粒。在此过程中，鱼糜中的蛋白质（主要是肌动蛋白和肌球蛋白）受热发生变性，导致蛋白质三维结构发生变化，从而暴露出原本隐藏的羟基和氨基酸侧链，形成了具有一定弹性、黏性和保水能力的网状结构[15]。当温度持续上升至50~70 ℃时，内源组织蛋白酶活性最强，开始降解相应的蛋白质，导致先前形成的稳定网状结构逐渐裂解，凝胶强度与保水性降低，鱼糜发生了凝胶劣化[16]。鱼糕化是鱼糜凝胶过程的最后一个阶段，特指在温度达到70 ℃时，蛋白质发生变性并重新排列的现象。在此阶段，蛋白质由于内部聚集状态的变化，形成连续的三维网状结构。同时，内源组织蛋白酶活性受到抑制，促使三维网状结构转变为延续、均匀的不可逆空间结构。鱼糕化后，鱼糜凝胶表现出卓越的弹性、保水性和黏性[17]。

2　多酚改善鱼糜凝胶特性的机制

鱼糜凝胶的形成主要与MP自身的聚集有关，

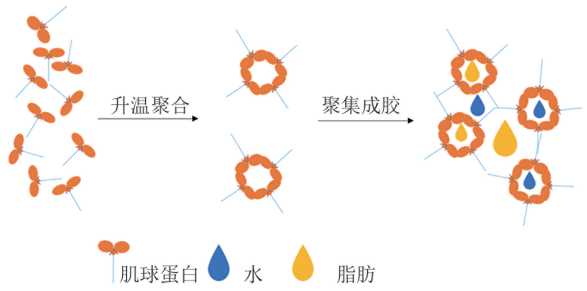


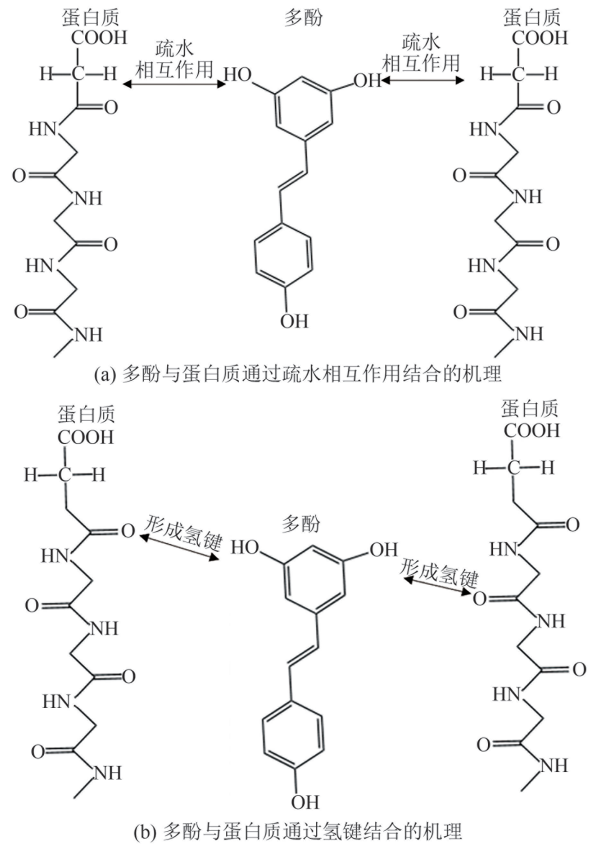
图1　鱼糜凝胶形成机制

Fig. 1　Gelation mechanism of surimi

多酚可以通过非共价和共价作用与MP结合，提升其结构稳定性、聚集性和可溶性[18]。其中非共价作用为可逆作用力，包括疏水相互作用、范德华力、氢键和离子相互作用等；而共价作用是不可逆作用力，多酚与MP间的共价键主要通过酶促反应、氧化反应或加热形成[19]。

2.1　非共价作用

图2展示了多酚与MP的非共价结合机理[20-21]：两者之间的非共价作用通过多酚的芳香环与蛋白质的疏水性氨基酸残基之间的相互作用形成[20]。多酚上的酮基与蛋白质上的羟基结合形成了氢键，以保持结构的稳定[21]。Rohn等[22]发现单宁与疏水性氨基酸可通过疏水相互作用结合，儿茶素与作为氢受体的氨基酸通过氢键结合。虽然非共价结合是可逆且不稳定的，但可以改善鱼糜的凝胶特性，因此在鱼糜加工业中仍占有一席之地。



(a) 多酚与蛋白质通过疏水相互作用结合的机理

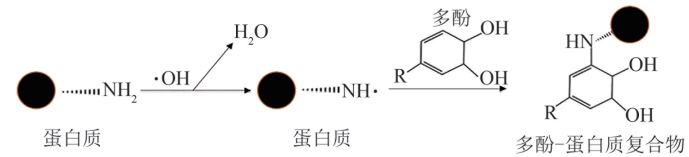
(b) 多酚与蛋白质通过氢键结合的机理

图2　多酚与蛋白质通过疏水相互作用和氢键进行非共价结合的机理

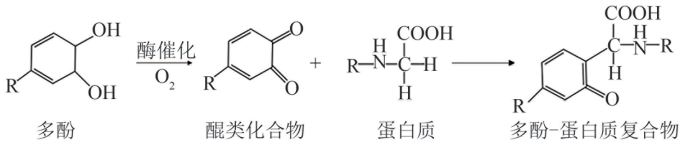
Fig. 2　Mechanism of non-covalent binding of phenols and proteins by hydrophobic interactions and hydrogen bonds

2.2 共价作用

植物多酚的还原性很强，易被氧化成相应的半醌和醌，而醌类化合物则通过共价键与蛋白质结合成偶联物，常见的共价结合方法包括自由基结合、碱处理结合以及酶催化结合等[23]。其中自由基接枝法是最常用、最快速且应用范围最广的结合方法，该方法成本低、安全性高且绿色环保[24-25]，见图 3(a)。如图 3(b)所示，酶催化结合法是利用不同种类的酶将多酚催化成醌类化合物，使其与蛋白质中的亲核氨基酸残基或游离的氨基酸残基结合，生成新的聚合物。研究发现，酶催化结合法可通过增强共价键作用来诱导蛋白质折叠，提高凝胶特性[25]。



(a) 多酚与蛋白质通过自由基接枝法共价结合的机制



(b) 多酚与蛋白质通过酶催化结合法共价结合的机制

图 3 多酚与蛋白质通过自由基接枝法与酶催化结合法共价结合的机制

Fig. 3 Mechanism of covalent bonding between polyphenols and proteins through free radical grafting and enzyme catalysis

多酚通过非共价和共价作用与 MP 结合，2 种作用方式得到的鱼糜凝胶特性有所不同：非共价作用主要通过氢键、疏水相互作用和静电相互作用实现，过程可逆且不涉及化学键的形成，可以提高鱼糜的保水性和稳定性，改善凝胶强度，对 MP 的结构影响较小。而共价结合涉及多酚与 MP 之间化学键的形成，该反应过程不可逆，会永久改变蛋白质的化学结构，使鱼糜变得坚硬，降低人们对鱼糜的感官评价及购买欲望[26]。

3 影响多酚与 MP 相互作用的因素

MP 与多酚之间的相互作用会影响 MP 的二级结构、三级结构、晶体结构和微观结构。鱼糜中的 MP 在凝胶形成过程中会发生一系列变化，包括变性、解离、聚集以及凝胶化等。多种因素会制约或破坏多酚与 MP 的相互作用，如多酚类型、多酚与 MP 的浓度比、pH、反应温度等。因此，作者进一步总结了不同因素对多酚与 MP 相互作用的影响，旨在更合理地利用多酚这种外源添加剂来改善鱼糜凝胶特性，提高鱼糜品质，为开发新型复合鱼糜制品提供新思路[27-28]。

3.1 多酚的种类

MP 变性聚集形成凝胶时，会通过分子间相互交联形成网状结构，而多酚增强鱼糜凝胶特性也是通过促进 MP 聚集，形成更加致密的三维网状结构来实现的[29]。根据促进 MP 凝胶的方式可以将多酚分为黄酮类化合物、酚酸类化合物、单宁类化合物以及芪类化合物(见图 4)。

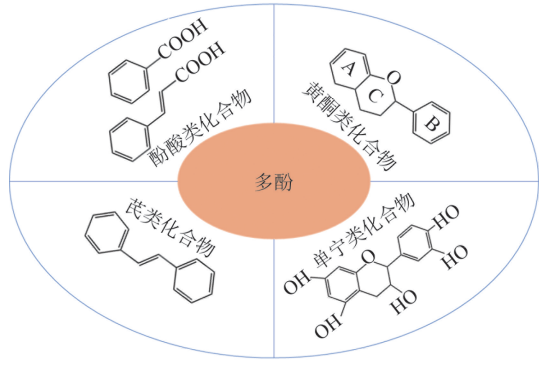


图 4 促进 MP 凝胶的多酚种类

Fig. 4 Categories of polyphenols that promote the gelation of MP

3.1.1 黄酮类化合物

黄酮类化合物广泛存在于水果和蔬菜等食物中，是植物次生代谢产物中分布最广泛的一类化合物，具有清除自由基、抗氧化、抗菌、抗癌等多种生物学作用[30]。黄酮类化合物中羟基位点以及黄酮类化合物的疏水性是影响其与 MP 结合的重要因素。

黄酮醇是黄酮类化合物中占比最多的化合物，如图4所示，黄酮醇是根据黄酮中C环上的羟基与羰基来区分，并且根据B环上的羟基数量与位置而命名。目前已命名的黄酮醇约有900种，主要包括槲皮素、山柰酚和异鼠李素[31]。黄酮醇与MP一般通过氢键、疏水相互作用等非共价方式结合，且不同结构的黄酮醇与MP非共价结合的作用力大小不同。槲皮素的氢键多于山柰酚，但山柰酚与MP产生的对接能却大于槲皮素与MP产生的对接能，原因可能是山柰酚与MP结合的范德华力与疏水相互作用力更强[32]。

儿茶素是茶叶中的主要活性成分，其结构基础是典型的C_6—C_3—C_6的类黄酮骨架，C-3位的羟基或没食子酸酯基团和B环上的邻二羟基或邻三羟基导致了儿茶素的结构和功能差异[33]。儿茶素的单体形式可以分为表儿茶素和非表儿茶素形式，其中表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）是含量最丰富的表儿茶素单体，可作为衡量儿茶素质量的指标[34]。EGCG通过与MP形成氢键、疏水相互作用等非共价键来影响蛋白质的二级和三级结构，导致蛋白质结构改变。当低浓度EGCG与MP相互作用时，EGCG首先被氧化成醌类物质，紧接着巯基在醌类化合物的B环上发生多次取代，使得多酚与蛋白质交联在一起，从而提高凝胶特性。但当高浓度EGCG与MP相互作用时，巯基与醌类化合物只会发生一次取代反应，从而阻碍蛋白质间二硫键的生成[35]。

3.1.2　酚酸类化合物

大多数植物中都含有酚酸，根据其结构特点可分为羟基苯甲酸与羟基肉桂酸，最常见的羟基肉桂酸有原儿茶酸、咖啡酸（CA）和阿魏酸[36]。酚酸在多酚类化合物中独具优势，其抗炎和抗氧化特性较强，因此主要被用作抗氧化剂。近些年的研究发现，酚酸可以增强MP凝胶特性，可能是酚酸增加了MP的α螺旋含量，还通过—SH和—NH_2基团与MP发生共价作用，生成CA-MP复合物，有助于MP形成更均匀的凝胶网络结构[37]。

3.1.3　芪类化合物

芪类化合物是指具有均匀的二苯乙烯母核或其聚合物的一类多酚，芪类化合物的结构由C_6—C_2—C_6结构骨架组成，通过一个双键将2个苯环连接，形成顺式与反式这2种异构体。研究表明，与顺式异构体相比，反式异构体具有更强的生物活性[38]。白藜芦醇是二苯乙烯中最常见的多酚，其苯环上有3个可以与MP产生氢键的羟基。Jin等[39]发现白藜芦醇通过抑制羰基的生成来减少巯基损失，从而促进鸭胸肌肉中MP的修饰、交联并且延缓其变性，达到提高凝胶特性的作用。此外，白藜芦醇也可通过非共价键与MP结合，改善其流变学特性，促进MP凝胶网络的形成[40]。因此芪类化合物可以促进MP凝胶的形成。

3.1.4　单宁类化合物

单宁类化合物因具有足够数量的羟基和部分其他基团，可以与蛋白质形成复合物后用于食品加工中。单宁类化合物在碱性条件下易被氧化成对应的醌，而醌作为一种亲电中间体，很容易与MP结合[41-42]。研究表明，氧化单宁（OTA）可使鲭鱼鱼糜凝胶形成更均匀的网状结构，具有更细致的重链和更强的吸水能力，原因在于OTA提供了更多的结合位点[43]。

3.2　多酚与蛋白质的浓度比

多酚与蛋白质的浓度比会引起MP构象的变化，影响多酚的氢供体数量与分布，进而影响多酚与MP之间的作用方式。Han等[44]向鱼糜中添加褐藻提取物（PE）与间苯三酚（PG）时，添加量不同会呈现出2种不同的络合机制：高剂量单齿络合机制和低剂量多齿络合机制。通过扫描电镜的图像可以观察到，质量分数1%的PE可作为鱼糜凝胶的增强剂，而质量分数1%的PG对鱼糜凝胶特性的影响很小，原因在于PE在单齿反应机理下提供了大量结合位点，而质量分数1%的PG形成了自聚集，对鱼糜凝胶产生了负面影响。Yang等[37]研究表明，CA的浓度对鱼糜凝胶有不同的影响，低浓度CA可促进MP的凝胶进程，而高浓度CA则会抑制MP的凝胶进程，原因在于过量CA与MP通过—SH和—NH_2产生共价相互作用，形成了大量的蛋白质-苯酚络合物，延缓MP的凝胶进程。多酚与蛋白质的浓度比不同，所对应的络合机制也不同，所以应不断探究两者之间的最佳浓度比，以达到最理想的凝胶改善效果。

3.3 pH

多酚与蛋白质通常存在相互作用的最适pH，蛋白质所处环境的pH会影响其所带的电荷、解离状态及构象等指标，同时也会影响两者结合形成络合物的理化性质。Sun等[45]研究表明，在酸性（pH 3.8）和中性（pH 7.0）条件下，将茶多酚（TP）粉末加到蛋清蛋白（EWP）溶液中，所得络合物的DPPH自由基清除能力和铁还原能力大幅提高。中性条件下处理的EWP溶液的乳化性和稳定性更好，原因在于中性条件下采用TP处理使EWP的等电点显著降低，增加了络合物在pH为7.0时的静电相互作用力。Balange等[46]探究了不同pH条件下氧化的乙醇Kiam木提取物（EKWE）对鲭鱼鱼糜凝胶特性的影响，结果表明在碱性（pH为8和9）条件下氧化形成的EKWE具有提高鱼糜凝胶破断力和变形力的作用，这可能是因为碱性条件将EKWE中的酚类转化成醌，醌诱导多肽的氨基和巯基侧链形成二聚体。当pH为3时，EKWE中酚羟基的去质子化程度降低，导致氧化EKWE与MP的结合能力下降，使凝胶质构性能变差。

3.4 反应温度

一般来说，蛋白质结构、配体溶解度和部分非共价键强度与反应温度有关，因此改变温度会影响多酚与MP的相互作用。温度升高通常导致MP内的氢键断裂，产生新的结合位点，促进多酚与蛋白质之间的结合。Buamard等[47]发现温度升高会影响椰壳乙醇提取物与沙丁鱼鱼糜中MP的结合能力，当温度为65 ℃时，MP二级结构中α螺旋和β折叠的氢键断裂，MP形成无规卷曲，产生多酚与MP间的新结合位点。此外，升高温度还会使MP内部的疏水基团暴露，分子间疏水相互作用增强，从而提高多酚与蛋白质之间的结合能力[48]。但是仍有部分多酚与蛋白质的相互作用力在高温条件下会减弱。Vate等[49]研究发现随着反应温度的上升，鱿鱼墨酪氨酸酶和单宁的混合物对沙丁鱼凝胶特性的影响变弱，原因在于内源性蛋白酶使单宁与MP形成的聚合物发生解离，并且高度氧化的巯基阻碍了二硫键的形成，进而抑制MP形成凝胶。综上，反应温度升高会改变蛋白质构象和非共价作用力的强弱。

4 多酚与MP相互作用在增强鱼糜凝胶特性方面的应用

在鱼糜加工、贮藏及运输过程中，外界因素易造成产品的凝胶特性下降，大幅缩短产品贮藏期，多酚化合物作为外源添加剂能有效解决上述问题，改善鱼糜凝胶特性。不同结构的多酚与MP相互作用的效果也有所不同，根据分子结构将多酚分为：黄酮类化合物、酚酸类化合物、芪类化合物、单宁类化合物。不同种类多酚在改善鱼糜凝胶特性方面的应用见表1。

表1 不同种类多酚对鱼糜凝胶的作用效果及机制

Table 1 Effect and mechanism of different polyphenols on surimi gel

种类	名称	作用效果	作用机制	参考文献
黄酮类化合物	槲皮素	改善流变性能和凝胶特性，延长贮藏期	主要通过疏水和静电相互作用	[32,50]
	杨梅素	提高凝胶强度，抑制凝胶劣化过程，提高贮藏稳定性	抑制丝氨酸蛋白酶，促进多酚与MP之间形成共价键	[51-52]
	茶多酚	鱼糜凝胶的质构特性和持水性均显著提高，延缓鱼糜腐败	使α螺旋占比降低，β转角及无规卷曲占比增加，蛋白质更易聚集	[32]
酚酸类化合物	咖啡酸	增强鱼糜凝胶强度，获得更均匀稳定的网状结构	诱导MP构象变化，通过非共价作用与MP结合	[22]
芪类化合物	白藜芦醇	显著提高MP凝胶强度和保水性，增强贮藏稳定性	促使自由水向结合水和不易流动水转化，促使MP中疏水性基团暴露，增大MP粒径	[40]
单宁类化合物	单宁	改善鱼糜凝胶的质构及凝胶强度，形成更致密的凝胶网络，抑制鱼糜腐败	诱导MP的交联，同时影响内源性谷氨酰胺转移酶，促使其与MP的交联位点暴露	[59]

4.1 黄酮类化合物与MP相互作用的应用

根据分子结构将应用在鱼糜中的黄酮类化合物分为黄酮醇与儿茶素。黄酮醇中的槲皮素、杨梅素、山柰酚以及儿茶素中的TP、EGCG和鹧鸪茶提取物（MOE）都能与MP相互作用，从而提高鱼糜凝胶特性。

槲皮素是一种天然黄酮醇化合物，主要通过氢键、疏水相互作用和静电相互作用与MP结合，起到保持MP的α螺旋结构并增加MP表面疏水性的作用。通过研究槲皮素对南美白对虾糜凝胶性质（乳化性能、二级结构以及质构）的影响，发现槲皮素可以提高凝胶的特性[50]。槲皮素修饰后的MP具有较高的乳化性能，提高了MP表面疏水性与凝胶强度，使用分子对接技术探究槲皮素与MP相互作用的机理，发现槲皮素与MP之间存在疏水与静电相互作用，导致MP表面非极性作用力增加，使MP形成的凝胶结构更加致密[32]。

杨梅素中的二氢杨梅素（DMY）也具有作为鱼糜凝胶增强剂的潜力。Yu等[51]研究发现，在DMY存在下，MP凝胶化最关键的分子力是氢键，其次是静电相互作用。通过分子对接技术发现，DMY与MP之间形成了3种共价键（Lys-DMY-Lys、Lys-DMY-Cys或Cys-DMY-Lys、Cys-DMY-DMY-Cys），这些共价键抑制了鱼糜凝胶劣化。岳尧等[52]在鲢鱼肌球蛋白溶液中加入不同浓度（0、1×10^{-5}、2×10^{-5}、3×10^{-5}、4×10^{-5}、5×10^{-5} mol/L）的DMY储备液，随着DMY浓度的增加，肌球蛋白的溶解度和总巯基含量也逐渐增加，当浓度为4×10^{-5} mol/L时，溶解度和总巯基含量达到最高，鲢鱼鱼糜的疏水性和凝胶特性也随之提升。这是因为鲢鱼肌球蛋白的侧链基团受到DMY的影响，通过氢键与静电相互作用促进肌球蛋白自聚集，改变了肌球蛋白的构象。

儿茶素不仅可以作为抗氧化剂，还可以作为凝胶增强剂应用在鱼糜制品中。将EGCG添加到鲢鱼鱼糜中并检测其MP的二级结构，发现EGCG的添加使MP二级结构中的α螺旋结构向无规卷曲和β转角结构转化，该转化有利于后续高温诱导MP相互交联，增强鱼糜的凝胶强度[32]。Wu等[53]将TP添加到罗非鱼鱼糜中，随着贮藏时间从0 d增加到7 d，罗非鱼鱼糜中MP的氧化和降解得到显著延缓，同时其持水能力与硬度提高。研究表明，与单独加入蛋清的鱼糜凝胶相比，将TP修饰后的蛋清加到鱼糜中，鱼糜凝胶的质构特性和持水性均显著提高，通过检测储能模量和损耗模量，发现此时的凝胶形成了更加致密有序的结构，因此TP修饰后的蛋清可以作为鱼糜凝胶增强剂[54]。陈媚依[35]对MOE-MP复合鲢鱼鱼糜的分子间作用力进行检测，发现低添加量的MOE使鱼糜凝胶的离子键能低于对照组的离子键能，可能是因为MOE中含有的多糖、可溶性蛋白质等杂质扰乱了离子键的形成。随着MOE添加量的增加，其中的TP提供了更多氢供体，它们能够与MP的疏水基团形成更多氢键，使鱼糜凝胶形成更紧密的结构。

4.2　酚酸类化合物与MP相互作用的应用

CA是具有邻二酚结构的酚类，属于羟基肉桂酸的代表性化合物，其在氧化后通过与游离氨基酸反应并与MP交联，可作为改善鱼糜凝胶的外源添加剂[22]。Balange等[21]指出适量的氧化咖啡酸（OCA）可以显著改善鱼糜凝胶的断裂力与变形性，然而随着OCA浓度的升高，鱼糜凝胶的断裂力与变形性却呈现减弱趋势。这是因为高浓度的OCA会自聚集，破坏MP的交联过程，进而影响凝胶的形成[55]。将不同浓度的*L*-精氨酸（Arg）和OCA作为外源添加剂加到鳙鱼鱼糜中，并对鱼糜的凝胶强度进行检测。结果表明，同时添加Arg和OCA可显著增强鱼糜凝胶强度，优于空白组及单独添加Arg或OCA的效果，说明两者之间的协同作用促进了凝胶中致密网状结构的形成[56]。贾慧等[57]采用低场核磁共振检测OCA对马鲛鱼鱼糜弛豫时间的影响，发现试验组中不易流动水的峰（T_{22}）相较于对照组均向左偏移，说明此时OCA将部分自由水转化成吸附水，增强水与凝胶网络间的相互作用力，提升马鲛鱼鱼糜的保水性。

4.3　芪类化合物与MP相互作用的应用

白藜芦醇是芪类化合物中研究最广泛的一种多酚，因其优异的生物活性在食品领域中得到广泛应用。王悦松等[40]研究发现，随着白藜芦醇质量分数的增加，鲢鱼鱼糜的储能模量先增加后降低。这是因为少量的白藜芦醇可以诱导MP相互交联，使凝胶网状结构更致密且稳定，但过量的白藜芦醇会掩盖部分MP的反应官能团，减少白藜芦醇与MP的结合位点，阻碍凝胶形成。同时，白藜芦醇的添加显著提高了鱼糜中的结合水与不易流动水占比，降低了自由水占比，说明白藜芦醇可诱导鱼糜凝胶中自由水向结合水和不易流动水转化，改善MP对水分的束缚能力。通过SEM观察不同质量分数白藜芦醇对鲢鱼鱼糜凝胶微观结构的影响时发现，在白藜芦醇质量分数为0.15%时，MP分子之间以及MP与白藜芦醇

之间的相互作用最有利于形成结构致密、表面光滑和孔洞均匀的网状结构，与鲢鱼鱼糜的凝胶强度和质构检测结果相同。与单独添加乳液相比，以负载白藜芦醇（质量分数0.1%~0.3%）的红花籽油乳液作为外源添加剂加入金线鱼鱼糜后，白藜芦醇可以改善鱼糜凝胶的白度，并且白藜芦醇通过酚羟基与蛋白质中的羰基形成氢键，降低了蒸煮损失率，延长了凝胶的弛豫时间，显著提高了鱼糜凝胶强度[58]。

4.4 单宁类化合物与MP相互作用的应用

单宁类化合物大多存在于树皮、果实以及外壳中。Buamard等[47]将富含单宁化合物的椰壳乙醇提取物（ECHE）加到沙丁鱼鱼糜中，发现添加ECHE的沙丁鱼鱼糜具有更高的断裂力、凝胶强度以及更紧致的结构。ECHE能有效诱导MP交联，形成更稳定的凝胶网络，但会降低鱼糜的白度。研究表明，在斑点金山羊鱼鱼糜中使用微生物谷氨酰胺转移酶（MTGase）与ECHE作为凝胶增强剂，可以显著改善鱼糜的断裂力、质构与感官特性，这是因为MTGase促进了ECHE与MP交联位点的暴露[59]。此外，还有研究发现，OTA也会影响鲭鱼鱼糜的凝胶性能，添加OTA能增加结合位点，加强与MP的相互作用，形成更紧凑有序的凝胶微观结构[43]。

5 展望

多酚通过改善MP凝胶过程中的非共价和共价作用力提高鱼糜凝胶的品质，是增强凝胶特性效果较好的外源添加剂之一。此外，多酚还能通过影响凝胶中的水分变化或改变MP自身的构象，促使α螺旋向β折叠及无规卷曲转变，形成更均匀且紧凑的MP凝胶网状结构。这种影响受到多种因素的共同作用，包括多酚的种类、浓度、反应温度和pH。

为了充分挖掘多酚在提升鱼糜凝胶特性方面的潜力并扩大其在水产品加工中的应用，需从以下方面深入研究：1）多酚的颜色对鱼糜白度可能造成不利影响，会降低消费者的感官接受度，因此需探索有效的解决策略；2）多酚通过共价和非共价作用与蛋白质结合，但这2种作用对凝胶形成的影响占比还需进一步探索；3）探索不同多酚或多酚与其他添加剂的组合应用，以实现协同效应，进一步增强对鱼糜凝胶特性的改善效果，并拓展其在食品工业中的应用；4）优化多酚的提取工艺，克服当前多酚难以工业化生产的局限，解决提取过程中遇到的技术难题，如提取效率低、纯度不高等。因此，发展成本低廉且能显著增强凝胶特性的多酚化合物用于提高鱼糜凝胶特性，是未来鱼糜加工领域的重要发展方向。

参考文献

[1] PARK J W. Surimi and surimi seafood[M]. 3rd ed. Boca Raton:CRC Press,2013.

[2] 刘前，吴靖娜，陈晓婷，等. 加工工艺对鱼糜及其制品品质影响的研究进展[J]. 渔业研究，2019，41(6)：540-548.
LIU Q，WU J N，CHEN X T，et al. Research progress on the effect of processing technology on the quality of surimi and its products[J]. Journal of Fisheries Research，2019，41(6)：540-548.(in Chinese)

[3] OKITA A，TAKAHASHI K，ITAKURA M，et al. A novel soft surimi gel with functionality prepared using alcalase for people suffering from dysphagia[J]. Food Chemistry，2021，344：128641.

[4] 农业农村部渔业渔政管理局，全国水产技术推广总站，中国水产学会. 2022中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2022：45-89.

[5] 励建荣，王忠强，仪淑敏，等. 天然抗氧化剂对鱼糜及鱼糜制品抗氧化能力及品质影响的研究进展[J]. 食品科学，2021，42(21)：1-7.
LI J R，WANG Z Q，YI S M，et al. Progress in research on the effect of natural antioxidants on the antioxidant capacity and quality of surimi and surimi products[J]. Food Science，2021，42(21)：1-7.(in Chinese)

[6] LIANG F，ZHU Y J，YE T，et al. Effect of ultrasound assisted treatment and microwave combined with water bath heating on gel properties of surimi-crabmeat mixed gels[J]. LWT-Food Science and Technology，2020，133：110098.

[7] WALAYAT N，LIU J H，NAWAZ A，et al. Role of food hydrocolloids as antioxidants along with modern processing techniques on the surimi protein gel textural properties，developments，limitation and future perspectives[J]. Antioxidants，2022，11(3)：486.

[8] 张啸峰，王鑫淼，陈建设，等. 直链/支链淀粉对鱼丸质构特性及感官品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(3)：57-63.
ZHANG X F，WANG X M，CHEN J S，et al. Effects of amylose/amylopectin on texture and organoleptic qualities of fish balls[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，

2023，42(3)：57-63.(in Chinese)

[9] 陈誉，罗磊，王硕，等. 咖啡果壳多酚的提取及抗氧化和抗炎特性[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(8)：104-111.
CHEN Y，LUO L，WANG S，et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of polyphenols extracted from coffee cherry husks[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(8)：104-111.(in Chinese)

[10] 陈晓玲，管维良，施佩影，等. 谷物醇溶蛋白与植物多酚的互作机理及应用研究进展[J]. 食品科学，2022，43(17)：353-361.
CHEN X L，GUAN W L，SHI P Y，et al. Review on recent progress in the mechanism and application of interaction between prolamins and polyphenols[J]. Food Science，2022，43(17)：353-361.(in Chinese)

[11] 秦影，欧昌荣，汤海青，等. 鱼糜制品凝胶特性研究进展[J]. 核农学报，2015，29(9)：1766-1773.
QIN Y，OU C R，TANG H Q，et al. Research progress on gel properties of surimi products[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2015，29(9)：1766-1773.(in Chinese)

[12] 李钰金，林洪，赵元晖，等. 蛋白质类添加物在鱼糜制品中的应用现状及发展趋势[J]. 食品研究与开发，2020，41(5)：220-224.
LI Y J，LIN H，ZHAO Y H，et al. Application status and development trend of protein additives in fish surimi products[J]. Food Research and Development，2020，41(5)：220-224.(in Chinese)

[13] JIAO X D，YANG H Y，LI X Y，et al. Green and sustainable microwave processing of surimi seafood：a review of protein component interactions，mechanisms，and industrial applications[J]. Trends in Food Science & Technology，2024，143：104266.

[14] YUAN L，KONG Y F，LENG W J，et al. *L*-glutamic acid affects myosin aggregation and the physical properties of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi gels[J]. Food Bioscience，2021，40：100886.

[15] MACFARLANE J J，SCHMIDT G R，TURNER R H. Binding of meat pieces：a comparison of myosin，actomyosin and sarcoplasmic proteins as binding agents[J]. Journal of Food Science，1977，42(6)：1603-1605.

[16] ZHOU A M，LIN L Y，LIANG Y，et al. Physicochemical properties of natural actomyosin from threadfin bream (*Nemipterus* spp.) induced by high hydrostatic pressure [J]. Food Chemistry，2014，156：402-407.

[17] 曹云刚. 植物多酚对肉蛋白氧化稳定性和功能特性的影响机理及应用[D]. 无锡：江南大学，2016.

[18] 房思维，余进祥，郭全友，等. 外源添加剂对小龙虾虾糜制品凝胶特性的影响及协同效应[J]. 食品与机械，2024，40(8)：23-32.
FANG S Y，YU J X，GUO Q Y，et al. Effect and synergy of different exogenous additives on gel properties of the crayfish surimi products[J]. Food & Machinery，2024，40(8)：23-32.(in Chinese)

[19] 陈婷婷，郭全友，包海蓉. 外源添加物和辅助加工技术对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响[J]. 食品与机械，2023，39(2)：214-220，235.
CHEN T T，GUO Q Y，BAO H R. Effects of exogenous additives and auxiliary processing techniques on temperature scanning in dynamic rheology ofsurimi gel [J]. Food & Machinery，2023，39(2)：214-220，235 .(in Chinese)

[20] YI X Z，CHEN Y，DING B M，et al. High internal phase Pickering emulsions prepared by globular protein-tannic acid complexes：a hydrogen bond-based interfacial crosslinking strategy[J]. Journal of Molecular Liquids，2023，370：121025.

[21] BALANGE A，BENJAKUL S. Enhancement of gel strength of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) surimi using oxidised phenolic compounds[J]. Food Chemistry，2009，113(1)：61-70.

[22] ROHN S. Possibilities and limitations in the analysis of covalent interactions between phenolic compounds and proteins[J]. Food Research International，2014，65：13-19.

[23] SUN X H，SARTESHNIZI R A，UDENIGWE C C. Recent advances in protein-polyphenol interactions focusing on structural properties related to antioxidant activities[J]. Current Opinion in Food Science，2022，45：100840.

[24] BAPTISTA R C，HORITA C N，SANT'ANA A S. Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood：a review[J]. Food Research International，2020，127：108762.

[25] ALI M，KEPPLER J K，COENYE T，et al. Covalent whey protein-rosmarinic acid interactions：a comparison of alkaline and enzymatic modifications on physicochemical，antioxidative，and antibacterial properties[J]. Journal of Food Science，2018，83(8)：2092-2100.

[26] SAHRAEIAN S，RASHIDINEJAD A，GOLMAKANI M T. Recent advances in the conjugation approaches for enhancing the bioavailability of polyphenols[J]. Food Hydrocolloids，2024，146：109221.

[27] GARCÍA-ESTÉVEZ I，RAMOS-PINEDA A M，ESCRIBANO-BAILÓN M T. Interactions between wine

phenolic compounds and human saliva in astringency perception[J]. Food & Function, 2018, 9(3): 1294-1309.

[28] 王卉楠,励建荣,李学鹏,等. 鱼糜组分间相互作用对其凝胶特性影响的研究进展[J]. 中国食品学报,2022,22(9):365-375.
WANG H N, LI J R, LI X P, et al. Research progress on the effect of component interactions on the gel properties of surimi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 365-375.(in Chinese)

[29] ABDEL-HACK M E, DE OLIVEIRA M C, ATTIA Y A, et al. The efficacy of polyphenols as an antioxidant agent: an updated review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126525.

[30] MENG Y, WEI Z H, XUE C H. Deciphering the interaction mechanism and binding mode between chickpea protein isolate and flavonoids based on experimental studies and molecular simulation[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136848.

[31] BARRECA D, TROMBETTA D, SMERIGLIO A, et al. Food flavonols: nutraceuticals with complex health benefits and functionalities[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 117: 194-204.

[32] 裘乐芸,邢倩,邓泽元,等. 植物多酚与鲢鱼肌球蛋白相互作用及其对肌原纤维蛋白结构和凝胶形成的影响[J]. 中国食品学报,2021,21(5):48-56.
QIU L Y, XING Q, DENG Z Y, et al. The interaction of plant polyphenols with silver carp myosin and its effects on the structure and gel formation of myofibrillar protein[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 48-56.(in Chinese)

[33] LIU W G, LU H J, CHU X Y, et al. Tea polyphenols inhibits biofilm formation, attenuates the quorum sensing-controlled virulence and enhances resistance to *Klebsiella pneumoniae* infection in *Caenorhabditis elegans* model[J]. Microbial Pathogenesis, 2020, 147: 104266.

[34] WANG R, ZHOU W B, JIANG X H. Reaction kinetics of degradation and epimerization of epigallocatechin gallate (EGCG) in aqueous system over a wide temperature range[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(8): 2694-2701.

[35] 陈媚依. 鹧鸪茶提取物对鱼糜制品凝胶特性及保藏品质的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2020.

[36] SHAHIDI F, AMBIGAIPALAN P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: antioxidant activity and health effects: a review[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 820-897.

[37] YANG F H, JIN S S, LI X H, et al. Biotinylated caffeic acid covalent binding with myofibrillar proteins in alkaline conditions: identification of protein-phenol adducts and alterations in protein properties[J]. Food Chemistry, 2023, 416: 135818.

[38] KHAN Z A, IQBAL A, SHAHZAD S A. Synthetic approaches toward stilbenes and their related structures[J]. Molecular Diversity, 2017, 21(2): 483-509.

[39] JIN S J, WANG M, YANG H, et al. Dietary supplementation of resveratrol improved the oxidative stability and spatial conformation of myofibrillar protein in frozen-thawed duck breast meat[J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101261.

[40] 王悦松,刘香玲,李学鹏,等. 白藜芦醇对鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学,2023,44(12):42-49.
WANG Y S, LIU X L, LI X P, et al. Effect of resveratrol on gel properties of silver carp myofibrillar protein[J]. Food Science, 2023, 44(12): 42-49.(in Chinese)

[41] STRAUSS G, GIBSON S M. Plant phenolics as cross-linkers of gelatin gels and gelatin-based coacervates for use as food ingredients[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(1): 81-89.

[42] NACZK M, SHAHIDI F. Extraction and analysis of phenolics in food[J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1054(1): 95-111.

[43] BALANGE A K, BENJAKUL S. Effect of oxidised tannic acid on the gel properties of mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) mince and surimi prepared by different washing processes[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1693-1701.

[44] HAN Q Y, WANG Y X, CHU Q Q, et al. Effect of extracts derived from brown algae (*Sargassum horneri*) on the gel property and moisture distribution of hairtail surimi gel (*Trichiurus haumela*)[J]. Foods, 2022, 11(3): 411.

[45] SUN J, LIU T M, ZHANG F, et al. Tea polyphenols on emulsifying and antioxidant properties of egg white protein at acidic and neutral pH conditions[J]. LWT–Food Science and Technology, 2022, 153: 112537.

[46] BALANGE A K, BENJAKUL S. Effect of kiam wood extract as influenced by pH during oxygenation on mackerel surimi gel[J]. Journal of Food Biochemistry, 2011, 35(2): 574-595.

[47] BUAMARD N, BENJAKUL S. Improvement of gel properties of sardine (*Sardinella albella*) surimi using coconut husk extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 146-155.

[48] PRIGENT S V E，GRUPPEN H，VISSER A J W G，et al. Effects of non-covalent interactions with 5-O-caffeoylquinic acid（chlorogenic acid）on the heat denaturation and solubility of globular proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2003，51(17)：5088-5095.

[49] VATE N K，BENJAKUL S. Combined effect of squid ink tyrosinase and tannic acid on heat induced aggregation of natural actomyosin from sardine[J]. Food Hydrocolloids，2016，56：62-70.

[50] LI N，ZHANG K X，DONG X H，et al. Modification of the structure and function of myofibrillar protein by structurally relevant natural phenolic compounds[J]. Food Bioscience，2023，53：102676.

[51] YU Q Y，FENG C S，LIANG S J，et al. Dihydromyricetin as a potential enhancer for surimi gels with anti-modori activity：a molecular docking and experimental validation[J]. Food Hydrocolloids，2023，145：109117.

[52] 岳尧，张震，黄万成，等. 二氢杨梅素对鲢鱼肌球蛋白理化性质及蛋白构象的影响[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(15)：78-84.
YUE Y，ZHANG Z，HUANG W C，et al. Effects of dihydromyricetin on the physicochemical properties and protein conformation of myosin in *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. Journal of Food Safety & Quality，2023，14(15)：78-84.(in Chinese)

[53] WU J，LI C S，LI L H，et al. Improved physicochemical properties and product characteristics of tilapia surimi by tea polyphenols during chilled storage[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，167：113822.

[54] ZHOU X X，CHEN T，LIN H H，et al. Physicochemical properties and microstructure of surimi treated with egg white modified by tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids，2019，90：82-89.

[55] JI H J，ZHANG H M，WANG Y Z，et al. Feasibility of caffeic acid as a crosslinking agent in modifying acellular extracellular matrices[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications，2023，677：182-189.

[56] XIONG Z Y，SHI T，ZHANG W，et al. Improvement of gel properties of low salt surimi using low-dose *L*-arginine combined with oxidized caffeic acid[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，145：111303.

[57] 贾慧，夏俪宁，李琦，等. 两种多酚对马鲛鱼鱼糜凝胶特性的改善[J]. 食品与发酵工业，2018，44(10)：90-95.
JIA H，XIA L N，LI Q，et al. Improvement of the gel properties of Japanese Spanish mackerel(*Scomberomours niphonius*) surimi by two polyphenols[J]. Food and Fermentation Industries，2018，44(10)：90-95.(in Chinese)

[58] 宋春勇，洪鹏志，周春霞，等. 负载白藜芦醇的红花籽油乳液对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品科学，2022，43(24)：102-109.
SONG C Y，HONG P Z，ZHOU C X，et al. Effect of safflower seed oil emulsion loaded with resveratrol on the quality of *Nemipterus virgatus* surimi gel[J]. Food Science，2022，43(24)：102-109.(in Chinese)

[59] SINGH A，PRABOWO F F，BENJAKUL S，et al. Combined effect of microbial transglutaminase and ethanolic coconut husk extract on the gel properties and *in vitro* digestibility of spotted golden goatfish (*Parupeneus heptacanthus*) surimi gel[J]. Food Hydrocolloids，2020，109：106107.

（责任编辑：史润东东）