

辐照对肌肉蛋白凝胶性能的影响

林娴萍 杨文鸽

(宁波大学海洋学院 宁波 315211)

摘要 肌肉蛋白的凝胶性能是肉类及其制品重要的功能特性,决定着肉制品独特的质构、多汁性、脂肪含量、感官特性等品质。作为一种新颖的食品保鲜技术,辐照有可能导致蛋白分子组成及其结构发生变化,从而对肌肉蛋白的凝胶形成能力及其凝胶性能产生影响。本文在介绍肌肉蛋白凝胶形成机理的基础上,综述了辐照对肌肉蛋白凝胶持水性、力学性能特征和结构影响的研究:过高剂量辐照容易引起肌肉蛋白持水性的下降,造成肉制品的汁液流失;辐照条件或辐照原料不同,辐照对肌肉蛋白凝胶质构和流变学特性所产生的影响不同,而肌肉蛋白及其凝胶结构的辐照效应则更为复杂。论文还展望了辐照对肌肉蛋白凝胶性能影响的研究。

关键词 辐照,肌肉蛋白,凝胶性能

中图分类号 TL99

作为一种非热杀菌方式,辐照技术可在食品原包装下进行连续、快速、机械化操作,处理效率高,而且低剂量即具有杀虫、灭菌彻底等优点,在控制食源性疾病的发生、降低农产品产后损耗、降解和破坏食品中的有害残留物和食物过敏原、延长食品货架期等方面具有明显的优越性,同时合理的辐照工艺还可提高谷物、酒类、果蔬和肉类等产品的食用及工艺品质。1980年FAO、WHO等提出“任何辐照食品当其总体平均吸收剂量不超过10kGy时,没有毒理学危险,不再要求做毒理学试验”,此后各国开始将辐照技术广泛应用于食品领域,至今全球已有200多种辐照食品在50多个国家获得批准,截止2012年中国允许的辐照食品也已达7大类^[1-3],包括豆类;谷物及其制品;冷冻包装畜禽肉类;水果蔬菜类;熟畜禽肉类;香辛料类和水产品类56个品种。在食品应用中,辐照源主要有3种类型:放射性核素产生的 γ 射线、机械源产生的X射线和高能电子束,其中以 ^{60}Co - γ 射线的研究和应用最广。近年来,随着我国高能电子加速器自主研发能力的提高,电子加速器大规模用于食品辐照已成为可能^[4]。

肉类富含蛋白质、脂肪、必需氨基酸、维生素等多种营养成分,是人类营养膳食的必需品,但其

丰富的营养也极易引起各种病原菌、腐败菌的污染。辐照作为一种新型冷加工保鲜技术,较之传统的高温高压、加热杀菌等方式,可有效杀灭肉类食品中的微生物,同时对食品风味及其品质产生较小影响,已广泛应用于肉类及肉制品的保鲜^[5],辐照后的畜禽及水产等肉制品已在20多个国家进行商业化销售。在肉类食品中,肌肉蛋白具有很强的凝胶形成能力,其形成的凝胶网状结构可吸附水分、风味物质、糖及其它成分,决定着肉制品独特的质构、多汁性、感官等品质,因此肌肉蛋白凝胶特性的研究在肉类食品及其品质研究中具有举足轻重的地位。

目前关于辐照对肉制品影响的研究主要集中在杀菌保鲜效果、感官和营养成分的变化,对肌肉蛋白凝胶特性的影响研究及其综述较少。本文在介绍肌肉蛋白凝胶形成机理的基础上,就辐照对肌肉蛋白结构及其凝胶特性的影响进行综述,旨在解析辐照对肌肉凝胶特性的影响机理,为辐照技术在肉类及其制品加工中的应用提供理论依据。

1 肌肉蛋白凝胶形成机理

蛋白质凝胶是指变性或非变性蛋白质的有序聚集而形成的三维网状结构,是吸引力和排斥力平衡

基金资助:国家自然科学基金(31371793、30972283),海洋公益性行业科研专项(201305013)资助

第一作者:林娴萍,女,1990年出生,2012年毕业于宁波大学海洋学院,目前为宁波大学海洋学院硕士研究生,水产品加工及贮藏专业, E-mail: linxianping.1990@163.com

通讯作者:杨文鸽,女,博士,教授,博士生导师, E-mail: yangwenge@nbu.edu.cn

收稿日期:初稿 2013-08-12,修回 2013-09-04

衡得到的大分子复合体。许多学者对肌肉蛋白的热诱导凝胶机理有深入研究,早在 1948 年, Ferry^[6]指出在热诱导凝胶中,变性和聚集是关键步骤,蛋白质受热使非共价键解离,导致巯基、疏水基团等官能团暴露,蛋白构象改变,这些变性的蛋白质发生聚集,依靠相邻蛋白分子间的多肽片段和氨基酸等官能团通过疏水作用、共价键、离子键和氢键等,使蛋白质发生足够的分子间交联,当蛋白质达到一定浓度时,便形成凝胶结构。凝胶特性取决于变性和聚集的相对速率,蛋白质聚集速率低于展开速率,有利于形成细致的凝胶网络,反之则形成粗糙、无序的凝胶结构或凝结核。

在肌肉蛋白中,肌原纤维蛋白是最重要的蛋白质,占总蛋白含量一半以上,包括肌球蛋白、肌动蛋白、原肌球蛋白、肌钙蛋白等,其中肌球蛋白是肌肉形成凝胶的最主要蛋白质。肌肉蛋白凝胶的形成主要依靠肌球蛋白头尾部分的聚集,但不同种类的肌肉其凝胶形成机理存在差异。Sano 等^[7]研究了鲫鱼肌球蛋白不同肽链段的凝胶特性,提出凝胶弹性的形成始于 30–44 °C,不同肌球蛋白尾部的轻酶解肌球蛋白(LMM)肽链相互聚集,当温度上升到 51–80 °C 时,LMM 聚集体再和肌球蛋白头部的重酶解肌球蛋白(HMM)肽链凝集成更大的蛋白颗粒而形成网络结构。Sharp 等^[8]通过扫描电镜研究兔骨骼肌肌球蛋白,得出了与 Sano 不同的结论,在兔骨骼肌中,当温度达到 35 °C 时,肌球蛋白头部开始凝集,而尾部相互聚集的温度为 48 °C,温度大于 55 °C 时,大部分尾部区域完成聚集。Visessanguan 等^[9]在研究箭齿鲈鱼肌球蛋白热诱导凝胶时,通过圆二色谱分析发现从 9 °C 到 65 °C 的升温过程中,10 °C 时 α -螺旋显著减少,说明箭齿鲈鱼肌球蛋白开始变性的部位主要发生在尾部 α -螺旋区域。Wang 等^[10]则认为在肌肉蛋白凝胶中,肌球蛋白的头部和尾部区域在凝胶形成过程中同时发生相互作用。

除了热诱导促使肌肉蛋白形成凝胶,其它一些物理因素如超高压、超声波、微波、辐照等处理,也会对肉制品中的蛋白质等生物大分子产生独特的物理改性作用,影响对蛋白质分子构象有贡献的相互作用,从而改变蛋白质的空间结构和功能特性,对肌肉蛋白的凝胶形成能力产生影响。

2 辐照对肌肉蛋白及其凝胶性能的影响

低剂量的辐照就具有很强的杀菌等功能,可以

提高食物安全性,在畜禽肉和水产品保鲜中已被广泛应用。辐照对肉类食品进行杀菌保鲜的同时,其中的肌肉蛋白可能会发生一些变化,如蛋白结构改变、吸收光谱改变、蛋白质分子裂解及裂解后的小分子聚合、抗原性、蛋白酶活性改变等,这些变化将影响肌肉蛋白的变性、聚集或凝胶化等作用,影响肉制品品质。当肌肉蛋白的凝胶网络一旦形成,便表现出凝胶性能,凝胶性能主要通过凝胶的持水性、力学特性及其蛋白质和凝胶的结构特性进行表征。

2.1 辐照对肌肉蛋白凝胶持水性的影响

肌肉蛋白凝胶的持水性(WHC)是指水化后的蛋白胶体束缚水的能力,主要通过蛋白水合作用和毛细管作用将水分束缚在凝胶网络中,持水性的大小与食品质地、颜色、感官特征有重要关系,因此是反映肌肉蛋白凝胶特性的重要指标。

有关研究表明辐照影响肌肉蛋白凝胶的持水性,造成肉制品的汁液流失。如邓明等^[11]研究了冷却肉经 1、2、3 kGy 剂量 ^{60}Co - γ 射线辐照后的理化和感官特性变化,结果表明 1、2 kGy 剂量组冷却肉的 WHC 与对照组无差异,而 3 kGy 组的 WHC 明显低于对照组;Modi 等^[12]利用 4 kGy 剂量的 ^{60}Co - γ 射线辐照羊肉糜,发现辐照后羊肉糜的持水率显著低于未辐照组;Riebrooy 等^[13]采用 0、2、6 kGy 剂量 ^{60}Co γ -射线处理发酵鱼糜,显示 2 kGy 处理组样品的 WHC 与对照组无差异,但 6 kGy 处理后鱼糜的持水性明显下降,并认为持水性的下降与肌肉蛋白的变性有关;Yoon^[14]利用低剂量(2.2–2.9 kGy) ^{60}Co γ -射线处理熟鸡胸肉,辐照当天及冷藏 10 d 内,辐照组样品的蒸煮损失率略高于未辐照组,但之间的差异不明显;顾可飞^[15]分析了冷却猪里脊肉经 0、3、6、9 kGy 剂量电子束辐照处理后的感官变化,结果表明,刚辐照的肉的汁液流失率均略高于对照组,当剂量不超过 3 kGy 时,贮藏 21 d 内的里脊肉汁液流失率与对照组差异不显著,但 9 kGy 剂量组里脊肉的汁液流失明显。

Huff-Lonergan 等^[16]认为肉类蛋白持水性的降低是由于 pH 下降、肌肉蛋白氧化引起,并认为肌肉中的钙蛋白酶对保持水分起重要作用,钙蛋白酶具有降解肌间线蛋白的活性,肌间线蛋白降解程度越低,宰后肌肉中完整的肌间线蛋白将肌原纤维蛋白的收缩转化为整个细胞的收缩,造成水分流失。

高剂量辐照往往导致肌肉蛋白持水性的下降，其原因可能是由于高剂量辐照处理，使食品中的水分形成活性状态产生 $\cdot\text{OH}$ ，这些自由基会造成蛋白质氧化，降低钙蛋白酶的活性，使肌间线蛋白不被降解，导致水分流失，凝胶的持水力降低。可见适度的降解肌间线蛋白有利于肌肉蛋白水分的保持，在肉类的辐照保鲜中，应择取合适的剂量降低辐照对肉制品持水性的影响。

2.2 辐照对肌肉蛋白凝胶力学性能特征的影响

肌肉蛋白凝胶的力学性能主要通过质构和流变性来表征，包括凝胶强度、恢复度、硬度、粘结性、弹性等指标，借助这些指标可直观地了解凝胶状态，推测凝胶结构及其各组分的凝胶形成作用力^[17-18]。

辐照会引起肌肉蛋白凝胶质构变化。汪晓鸣^[19]比较了不同剂量的 γ 射线辐照后冷却猪肉糜品质的变化，贮藏时间为3 d时，在辐照剂量2–6 kGy的范围内，猪肉糜凝胶的恢复度总体上随剂量的提高而下降，5 kGy剂量组凝胶恢复度的下降幅度最大；粘结性总体上随剂量的提高而上升，3、4、5 kGy辐照组样品粘结性差异不明显，2 kGy组样品的粘结性品质明显优于其他辐照剂量组；弹性随剂量的提高而下降，当辐照剂量为6 kGy时，弹性最小，猪肉糜的商品性最差。Kim等^[20]认为在肉的成熟过程中，钙蛋白酶对肌肉蛋白的适度降解有助于肌肉嫩化，Rowe等^[21]曾在牛肉的宰后26 h内对其进行辐照(6.4 kGy)处理，结果证实冷藏14 d内辐照组牛肉剪切力明显高于未辐照组，且肌钙蛋白-T和肌间线蛋白的降解产物更少，原因在于辐照导致肌肉的氧化，抑制了钙激活酶的活性降低，从而抑制了钙蛋白酶的活性，降低了肌肉蛋白的降解程度，造成肌肉嫩度下降。Yoon^[14]研究 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线对熟鸡胸肉质构影响时，同样发现辐照组的剪切力显著高于对照组。

肉制品辐照时的温度对其蛋白凝胶的质构有显著影响。Jaczynski等^[22]利用0、1、2、4 kGy剂量电子束辐照不同温度的鱼糜制品(5℃、23℃和-18℃)，研究辐照剂量和温度对鱼糜制品凝胶特性的影响，发现对相同辐照温度的鱼糜制品，辐照剂量对其剪切力没有影响；当样品温度为5℃和23℃，电子束辐照对鱼糜制品的质构影响不显著，但-18℃的冷冻鱼糜制品辐照后硬度有显著的提高，推测这可能是由于电子束穿过冷冻鱼糜时形成

了新的化学键，使辐照鱼糜的胶凝机制发生了改变。类似的现象也出现在Segars等^[23]研究中，从硬度和粘结性的变化显示辐照杀菌对未冻结牛肉有嫩化作用，而对冻结牛肉则有硬化作用，且温度越低硬化作用越强，认为辐照对冻结和未冻结肉质构影响的差异在于辐照和冷冻的交互效应。

也有研究表明辐照对肉类的感官质地无显著影响，Wang等^[24]利用0、1、3、6、9 kGy剂量 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照南美白对虾，发现辐照样品的咀嚼度、弹性、硬度等质构指标无明显变化，Modi等^[12]利用 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照羊肉糜，Zhu等^[25]利用电子束处理鸡胸肉卷，均显示辐照对羊肉糜或鸡胸肉的质构无显著影响。本实验室研究了0–9 kGy剂量电子束对两种包装形式（普通、真空包装）的美国红鱼肉质构的影响，与对照组相比，辐照后两种包装形式的红鱼肉硬度略有下降，但辐照剂量对红鱼肉的硬度和弹性均无显著影响，3–9 kGy剂量范围内辐照，红鱼肉的硬度基本不变；相同辐照剂量下，包装形式对于红鱼肉硬度、弹性和恢复度的影响不显著。

辐照对肌肉蛋白凝胶质构和流变学特性的影响不同，这可能是由于实验设计、辐照类型、原料不同而引起，表明辐照对肉制品蛋白凝胶力学特性的影响较为复杂，尚需进一步研究。

2.3 辐照对肌肉蛋白及其凝胶结构的影响

蛋白质的结构是影响凝胶性能的内在因素，肌肉蛋白的分子组成、分子大小、空间构象等指标都可以直接或间接地反映蛋白的凝胶性能。Gomez-Guillen等^[26]对比了多种海水鱼的粘弹性和凝胶强度及凝胶的分子量和三维螺旋，发现比目鱼具有最好的凝胶形成能力和凝胶热稳定性；刘海梅等^[27]利用激光拉曼光谱、圆二色谱对鲢鱼鱼糜凝胶形成过程中蛋白质构象进行了表征，表示 α -螺旋和无规卷曲结构在鱼糜凝胶网络结构的形成中起着重要作用。

目前有许多学者阐述了辐照对肌肉蛋白结构的影响。顾可飞等^[28]认为食物分子经过电离辐照后产生离子、自由基等活性粒子，这些活性粒子可引发蛋白质发生诸如脱氢、脱羧、交联、降解、巯基氧化等一系列的化学反应，破坏蛋白质分子结构和构象，其破坏程度与辐照剂量成正相关。Giroux等^[29]在综述辐照对肉类成分的影响中，详细描述了辐照引起蛋白变性的过程：在有氧的条件下，主要发生

的是多肽链的断裂, 由于辐照产生的羟基自由基会引发 α 碳位多肽链的断裂, 在氧自由基的作用下, 会再次发生断裂形成烷基过氧化物或羟基衍生物; 在缺氧条件下, 主要发生的是聚集产生大分子物质, 羟基自由基会引起蛋白质分子之间非二硫共价键的交联, 因而形成二聚体、三聚体甚至多聚体。蛋白质一级结构的改变进而影响二级和三级结构, 导致蛋白质分子伸展, 进而更易受到羟基自由基的二次攻击。李银等^[30]以猪肉为研究对象, 利用低场核磁共振分析考察了羟自由基氧化体系中不同 H_2O_2 浓度对蛋白氧化程度及肌原纤维蛋白凝胶特性的影响, 得出随 H_2O_2 浓度的增加, 蛋白氧化程度加剧, 凝胶白度、持水力、硬度、咀嚼性及弹性模量下降, 可见肌原纤维蛋白的氧化会影响其凝胶形成, 破坏蛋白凝胶结构, 降低凝胶功能。

张明琦等^[31]研究了 $^{60}Co-\gamma$ 射线辐照对蟹过敏蛋白生化性质和抗原性的影响, SDS-PAGE 表明经过 3、5、7、9 kGy 辐照处理后, 蟹过敏蛋白条带均消失, 且无新的条带产生, 说明辐照破坏了过敏蛋白结构。Jaczynski 等^[32]采用 0、1、2、4、6、8、10 和 25 kGy 电子束处理狭鳕鱼糜, 测定鱼糜蛋白及其热诱导凝胶的巯基、表面疏水性、肌原纤维蛋白分子组成等指标, 结果表明, 电子束处理均会引起鱼糜蛋白及其凝胶中肌球蛋白重链的降解, 辐照时冻结的样品其降解速度较室温样品低; 当辐照剂量达到 25 kGy 时, 肌动蛋白的完整性略微受到影响; 鱼糜蛋白的巯基含量和表面疏水性随着辐照剂量的增加而下降, 而鱼糜凝胶的巯基含量、表面疏水性和剪切力随着辐照剂量的增加呈现先上升后下降的趋势, 其剪切力的增加主要通过疏水作用而不是二硫键的形成, 得出狭鳕鱼糜合适的电子束辐照剂量为 6 kGy。

随着科学技术的发展, 辐照对蛋白质结构的影响可通过电镜或各种波谱等现代分析手段直接观察, 运用电子扫描显微镜、激光扫描共聚焦显微镜等可直接观察蛋白质凝胶的微观表面形貌, 通过各种波谱观察蛋白质分子构象的变化, 了解蛋白凝胶中结构的变化, 如红外光谱、核磁共振和圆二色光谱等, 由此推测蛋白质分子的改性和交联情况^[33]。Yoon^[12]采用透射电镜比较了辐照和未辐照鸡胸肉的微观结构, 显示辐照鸡胸肉的肌节大小显著小于未辐照鸡胸肉, 辐照组的肌原纤维出现断裂, 肌原纤维的直径与未辐照组存在显著差异。Herrero 等^[34]

利用拉曼光谱研究了 0–8 kGy 剂量电子束对真空包装冷冻熏鲑鱼肉蛋白质二级结构的影响, 认为 8 kGy 剂量能使鱼肉蛋白中的 α -螺旋比例显著下降, β -折叠、 β -转角和无规卷曲增多; Lee 等^[35]采用圆二色谱法分析 γ 射线对肌红蛋白分子特性的影响, 研究表明随辐照剂量的升高, 肌红蛋白 α -螺旋含量降低的同时, 无规卷曲含量升高。在猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的研究中, Xu^[36]和 Chen 等^[37]分别发现随温度的升高或转谷氨酰胺酶的添加, 蛋白的 α -螺旋含量减少, 而 β -折叠、 β -转角和无规卷曲含量增加, 这些变化均有助于形成强而不可逆的凝胶。吴焯^[38]利用圆二色和拉曼光谱发现在受热过程中兔肌球蛋白的二级结构发生了明显变化, α -螺旋含量随温度升高逐渐降低、 β -折叠和无规卷曲含量则随温度升高而增加, 其化学作用力变化与二级结构变化有较强相关性, 认为 α -螺旋结构的丢失导致了肌球蛋白在低温状态下的天然结构被破坏, 暴露出蛋白质内部的大量基团如巯基和疏水基团, 继续加热逐步参与形成凝胶, 丢失的 α -螺旋转变成为 β -折叠和无规卷曲, 后两者参与了凝胶的结构。比较这些研究结果, 提示辐照引起肌肉蛋白 α -螺旋含量降低, 其它构象单元含量升高, 可能也有助于肌肉蛋白凝胶的形成。

3 展望

从现有的研究可以看出, 辐照对肌肉蛋白及其凝胶特性的影响研究已取得了一些成果, 但对其影响机制的解析还不完善。辐照诱导肌肉蛋白凝胶变化是一个复杂的动力学过程, 辐射源、辐照剂量的大小、肉制品的包装形式、原料的种类及辐照的温度等不同, 对肌肉蛋白及其凝胶性能的影响存在差异, 辐照影响肌肉蛋白结构及其凝胶特性的变化尚有很大的研究空间, 在以后的研究中可利用更新、更合适的技术, 如差示热量扫描仪、质构仪、电泳、核磁共振、激光拉曼光谱、圆二色谱及电镜等综合分析, 解析辐照影响肌肉蛋白微观结构及与凝胶形成之间的关系, 为肉制品加工过程提供理论依据, 以在进行辐照保鲜的同时进一步改善肉制品的品质。

参考文献

- 1 李湘, 郭东权, 陈云堂, 等. 电子束辐照对大米营养和蒸煮品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(15):

- 251-257.
- LI Xiang, GUO Dongquan, CHEN Yuntang, *et al.* Effect of electron beam irradiation on nutritive and cooking qualities of rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(15): 251-257.
- 2 Farkas J, Mohácsi-Farkas C. History and future of food irradiation [J]. Trends in Food Science and Technology, 2011, **22**(2-3): 121-126.
- 3 张莹, 朱加进. 电子束辐照技术及其在食品工业中的应用研究 [J]. 食品与机械, 2013, **29**(1): 236-239.
- ZHANG Ying, ZHU Jiajin. Review of development of electron accelerators on foods [J]. Food and Machinery, 2013, **29**(1): 236-239.
- 4 贾倩, 李淑荣, 高美须, 等. 电子束辐照对素鸡杀菌效果及品质特性影响的研究 [J]. 核农学报, 2012, **26**(2): 295-299.
- JIA Qian, LI Shurong, GAO Meixu, *et al.* Effect of electron beam irradiation on quality and decontamination of steamed tofu roll [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, **26**(2): 295-299.
- 5 Jouki M. Evaluation of gamma irradiation and frozen storage on microbial load and physico-chemical quality of turkey breast meat [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, **85**(4): 243-245.
- 6 Foegeding E A, Davis J P. Food protein functionality: a comprehensive approach [J]. Food Hydrocolloids, 2011, **25**(8): 1853-1864.
- 7 Sano T, Noguchi S F, Matsumoto J J, *et al.* Thermal gelation characteristics of myosin subfragments [J]. Journal of Food Science, 1990, **55**(1): 55-70.
- 8 Sharp A, Offer G. The mechanism of formation of gels from myosin molecules [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992, **58**(1): 63-73.
- 9 Visessanguan W, An H. Effects of proteolysis and mechanism of gel weakening in heat-induced gelation of fish myosin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, **48**(4): 1024-1032.
- 10 Wang S F, Smyth A B, Smith D M. Gelation properties of myosin: role of subfragments and actin in macromolecular interactions in food technology [A]. Parris N, Pearce J. Macromolecular interactions in food technology [C]. Washington D C: American Chemical Society. 1996: 124-133
- 11 邓明, 哈益明, 严奉伟, 等. 冷却肉低剂量辐照后的理化和感官特性变化 [J]. 食品科学, 2005, **26**(8): 121-126.
- DENG Ming, HA Yiming, YAN Fengwei, *et al.* Changes in physicochemical and sensory characteristics of chilled pork irradiated at low-dose gamma ray [J]. Journal of Food Science, 2005, **26**(8): 121-126.
- 12 Modi V K, Sakhare P Z, Sachindra N M, *et al.* Changes in quality of minced meat from goat due to gamma irradiation [J]. Journal of Muscle Foods, 2008, **19**(4): 430-442.
- 13 Riebroy S, Benjakul S, Visessanguan W. Effect of irradiation on properties and storage stability of Som-fug produced from bigeye snapper [J]. Food Chemistry, 2007, **103**(2): 274-286.
- 14 Yoon K S. Effect of gamma irradiation on the texture and microstructure of chicken breast meat [J]. Meat Science, 2003, **63**(2): 273-277.
- 15 顾可飞. 电子束辐照对冷藏猪脊肉品质特性的影响 [J]. 现代食品科技, 2013, **29**(3): 498-500.
- GU Kefei. Changes in quality characteristics of chilled pork fillet by electronic beam irradiation [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, **29**(3): 498-500.
- 16 Huff-Lonergan E, Lonergan S M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes [J]. Meat Science, 2005, **71**(1): 194-204.
- 17 杨谷毅, 王飞镝, 严霞波. 蛋白质凝胶的结构表征和应用研究进展 [J]. 材料导报, 2008, **22**(4): 104-107
- YANG Guyi, WANG Feidi, YAN Xiabo. Research development of structure characterization and application of protein gels [J]. Journal of Materials, 2008, **22**(4): 104-107.
- 18 Chaijan M, Panpipat W, Benjakul S. Physicochemical properties and gel-forming ability of surimi from three species of mackerel caught in Southern Thailand [J]. Food Chemistry, 2010, **121**(1): 85-92.
- 19 汪晓鸣. 辐照和山楂黄酮对冷却猪肉品质的影响 [D]. 南京. 南京农业大学. 2011.
- WANG Xiaoming. Effect on quality of chilled meat by irradiation and Hawthorn flavonoids extract [D]. Nanjing. Nanjing Agriculture University. 2011.
- 20 Kim Y H, Huff-Lonergan E, Lonergan S M. Effect of calcium lactate on m-calpain activity and protein

- degradation under oxidising conditions [J]. Food Chemistry, 2012, **131**(1): 73-78.
- 21 Rowe L J, Maddock K R, Lonergan S M, *et al.* Oxidative environments decrease tenderization of beef steaks through inactivation of μ -calpain [J]. Journal of animal science, 2004, **82**(11): 3254-3266.
 - 22 Jaczynski J, Park J W. Physicochemical properties of surimi seafood as affected by electron beam and heat [J]. Food Chemistry and Toxicology, 2003, **68**(5): 1626-1630.
 - 23 Segars R A, Cardello A V, Cohen J S. Objective and subjective texture evaluation of irradiation sterilized meat products [J]. Journal of Food Science, 1981, **46**(4): 999-1003.
 - 24 Wang H, Yang R J, Liu Y N, *et al.* Effects of low dose gamma irradiation on microbial inactivation and physicochemical properties of fried shrimp (*Penaeus vannamei*) [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, **45**(6): 1088-1096.
 - 25 Zhu M J, Mendonca A, Min B, *et al.* Effects of electron beam irradiation and antimicrobials on the volatiles, color, and texture of ready-to-eat turkey breast roll [J]. Food Chemistry and Toxicology, 2004, **69**(5): 382-387.
 - 26 Gomez-Guillen M, Trnay J, Fernandez-Diaz M D, *et al.* Structure and physical properties of gelatin extracted from different marine species: a comparative study [J]. Food Hydrocolloids, 2002, **16**(1): 25-34.
 - 27 刘海梅, 熊善柏, 谢笔钧, 等. 鲢鱼糜凝胶形成过程中化学作用力及蛋白质构象的变化 [J]. 中国水产科学, 2008, **15**(3): 469-475.
LIU Haimei, XIONG Shanbo, XIE Bijun, *et al.* Changes in the formation of chemical interactions and protein conformation in the process of silver carp surimi gel [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, **15**(3): 469-475.
 - 28 Giroux M, Lacroix M. Nutritional adequacy of irradiated meat-a review [J]. Food Research International, 1998, **31**(4): 257-264.
 - 29 顾可飞, 高美须, 李春红, 等. 辐照降低食物致敏性的研究进展 [J]. 核农学报, 2006, **20**(6): 524-526.
GU Kefei, GAO Meixu, LI Chunhong, *et al.* Progress in the study of reducing food allergenicity by irradiation [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2006, **20**(6): 524-526.
 - 30 李银, 李侠, 张春晖, 等. 羟自由基导致肉类肌原纤维蛋白氧化和凝胶性降低 [J]. 农业工程学报, 2013, **29**(12): 286-292.
LI Yin, LI Xia, ZHANG Chunhui, *et al.* Oxidation and decrease of gelling properties for meat myofibrillar protein induced by hydroxyl radical [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(12): 286-292.
 - 31 张明琦, 高美须, 支玉香, 等. 辐照对蟹过敏蛋白生化性质和抗原性的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, **42**(9): 3259-3264.
ZHANG Mingqi, GAO Meixu, ZHI Yuxiang, *et al.* Effects of irradiation on biochemical properties and antigenicity of crab allergen [J]. Agricultural Sciences in China, 2009, **42**(9): 3259-3264.
 - 32 Jaczynski J, Park J W. Physicochemical changes in Alaska pollock surimi and surimi gel as affected by electron beam [J]. Food Chemistry and Toxicology, 2004, **69**(1): 53-57.
 - 33 陈倩, 李沛军, 孔保华. 拉曼光谱技术在肉品科学研究中的应用 [J]. 食品科学, 2012, **33**(15): 307-313.
CHEN Qian, LI Peijun, KONG Baohua. Application of raman spectroscopy technique in meat science: a review [J]. Journal of Food Science, 2012, **33**(15): 307-313.
 - 34 Herrero A M, Carmona P, Ordonez J A, *et al.* Raman spectroscopic study of electron-beam irradiated cold-smoked salmon [J]. Food Research International, 2009, **42**(1): 216-220.
 - 35 Lee Y, Song K B. Effect of γ -irradiation on the molecular properties of myoglobin [J]. Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2002, **35**(6): 590-594.
 - 36 Xu X L, Han M Y, Fei Y, *et al.* Raman spectroscopic study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with textural characteristic [J]. Meat Science, 2011, **87**(3): 159-164.
 - 37 Chen H Y, Han M Y. Raman spectroscopic study of the effects of microbial transglutaminase on heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with textural characteristics [J]. Food Research International, 2011, **44**(5): 1514-1520.
 - 38 吴烨. 兔肌球蛋白热诱导凝胶化学作用力与凝胶结构功能关系的研究 [D]. 南京, 南京农业大学, 2010.
WU Ye. Study on the relationship between chemical

Effects of irradiation on the gelation properties of muscle protein

LIN Xianping YANG Wenge

(School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

ABSTRACT Gel properties of muscle protein are the important functional characteristics in meat and its products, which determine the meat products' unique quality, such as texture, juiciness, fat content and sensory characteristics. As a novel food preservation technique, irradiation may lead to changes in the composition and structure of protein molecule, and impact the gel forming ability and gelation properties of muscle protein. Based on the introduction of gel forming mechanism of muscle protein, effects of irradiation on the water holding capacity, mechanical properties and structure of muscle protein gel were reviewed in detail. High-dose irradiation could weaken the water holding capacity of muscle protein and result in the loss of meat juice. With different irradiation conditions or raw materials, influences of irradiation on the texture and rheological properties of muscle protein gels are varied, and effects on the structure of muscle protein and its gel are more complex. Finally, the research trend of irradiation effects on the gelation properties of muscle protein is put forward.

KEYWORDS Irradiation, Muscle protein, Gel properties

CLC TL99