

# 蛋白质氧化对乳清分离蛋白功能性质的影响

田童童<sup>1</sup>, 巩子路<sup>1</sup>, 朱新荣<sup>1</sup>, 邹圣冬<sup>2</sup>, 张建<sup>1,2</sup>

(1. 石河子大学食品学院, 新疆石河子 832003)

(2. 新疆生产建设兵团特色果蔬工程研究中心, 新疆石河子 832003)

**摘要:** 为了进一步研究蛋白质氧化对乳清分离蛋白(WPI)功能性质及流变学性质的影响, 试验采用两种不同浓度的氧化系统 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1 mmol/L~20 mmol/L) 和 FeCl<sub>3</sub> 浓度(0.1 mmol/L~2 mmol/L)对 WPI 分别氧化 1 h、3 h、5 h, 测定其性质。结果表明: 20 mmol/L 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化 WPI 5 h, 其乳化活性下降了 50% 以上; 1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> 氧化 WPI 3 h, 其凝胶硬度降低了 94.5%; 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 与 1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> 氧化 WPI 3 h, 其弹性从 0.976 下降到 0.713 和 0.721, 分别降低了 26.9% 和 26.1%; 当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 20 mmol/L 时, 弹性模量从 8154 Pa 降到 5399 Pa, 复合模量从 10890 Pa 降到 6653 Pa, 分别降低了 33.79% 和 38.91%; 当 FeCl<sub>3</sub> 浓度为 1 mmol/L 时, 弹性模量从 8154 Pa 降到 4935 Pa, 复合模量从 10890 Pa 降到 6049 Pa, 分别降低了 39.47% 和 44.45%。长时间高浓度的氧化条件使得蛋白质的空间结构受到严重影响, WPI 的功能性质及凝胶质地发生较大的变化。因此, 在实际生产中应尽可能地控制蛋白氧化的发生, 减少其因为氧化所带来的营养损失或者降低其应用价值。

**关键词:** 蛋白质氧化; 乳清分离蛋白; 功能性质; 乳化性质

文章编号: 1673-9078(2014)7-110-116

## Effect of Protein Oxidation on Functional Properties of Whey Protein Isolates

TIAN Tong-tong<sup>1</sup>, GONG Zi-lu<sup>1</sup>, ZHU Xin-rong<sup>1</sup>, ZOU Sheng-dong<sup>2</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2</sup>

(1. Food college, Shihezi University, Shihezi 832003, China) (2. Research Centre of Characteristic Fruit and Vegetable project of Xinjiang Production and Construction, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** The objective of this study was to explore the effect of protein oxidation on the functional and rheological properties of whey protein isolate (WPI). There were two different oxidation systems containing H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1 mmol/L~20 mmol/L) and FeCl<sub>3</sub> (0.1 mmol/L~2 mmol/L) in this experiment. WPI was treated by the oxidation systems for 1 h, 3 h and 5 h respectively. The result revealed that the emulsifying activity of WPI decreased over 50% under the condition of 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for 5h. The gel hardness decreased 94.5% owing to 1mmol/L FeCl<sub>3</sub> for 3 h. Additionally, results also showed that the elasticity of WPI was decreased from 0.976 to 0.713 and 0.721 respectively by 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for 5 h and 1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> for 3 h treatment. In addition, 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> led to the decrease of elastic modulus value of WPI decreased from 8154 Pa to 5399 Pa and decrease of the complex modulus value from 10890 Pa to 6653 Pa. When 1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> was used, the elastic modulus value declined from 8154 Pa to 4935 Pa and the complex modulus value was reduced from 10890 Pa to 6049 Pa. The spatial structure of proteins severely affected at the long time oxidizing conditions of high concentration. Therefore the functional properties and the gel texture of WPI were damaged significantly. Thus, protein oxidation should be avoided as much as possible in actual production for maintaining the nature characteristics of WPI, thereby preventing nutrient losses and promoting application value.

**Key words:** protein oxidation; whey protein isolates; functional property; emulsifying property

我国的乳及乳制品资源丰富, 分布广泛, 因其具

收稿日期: 2014-02-21

基金项目: 石河子大学高层次人才科研启动资金项目 (RGZX201127), 兵团科技支疆专项计划 (2010ZJ13), 石河子大学青年骨干教师培训项目 (3152SPXY01027)

作者简介: 田童童 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事食品生物化学研究

通讯作者: 张建 (1979-), 男, 博士, 副教授, 从事食品生物化学研究

有良好的营养和功能性质倍受消费者的青睐。据相关文献报导, 乳清分离蛋白是一种补充能量的重要蛋白质来源, 它可以提高人体肌肉的能量<sup>[1]</sup>。乳清分离蛋白因具有清除自由基和抗氧化活性的功能性质, 食品及饮品的加工过程中常常将其作为功能因子添加到产品中<sup>[2-4]</sup>。

然而在乳与乳品加工及贮藏过程中, 因其本身含有较高的不饱和脂肪酸、风味物质、金属催化剂等使

得原料乳及乳制品极易发生氧化,如脂肪氧化和蛋白质氧化,两种氧化联系紧密,脂肪氧化会促进蛋白质氧化,蛋白质氧化的同时也会伴随脂肪氧化<sup>[5]</sup>。正是因为氧化反应的发生使得其分子结构改变,从而造成乳品功能劣变、营养流失,严重影响了乳及乳品的感官和品质,甚至造成国民经济的损失和国人营养的缺失,所以氧化是引起乳与乳品质量劣变的重要因素之一<sup>[6]</sup>。目前针对乳及乳制品的氧化研究主要集中在脂质氧化,而蛋白质氧化对其功能性质及流变学性质的影响却鲜有报道。因此研究蛋白质氧化机制从而控制其发生氧化是非常有必要的。

近几年,崔旭海和孔保华等<sup>[7-9]</sup>在其试验研究中指出蛋白质氧化会使其疏水性增加从而导致溶解性降低;乳清分离蛋白的乳化性、溶解性、凝胶质地及凝胶形成能力会受到很大破坏;长时间高浓度的氧化会使得乳清分离蛋白分子结构及空间构象发生变化从而影响其功能性质。然而关于蛋白质氧化影响乳清分离蛋白系统功能性性质变化的研究报道较少。

在研究不同蛋白质氧化系统对蛋白结构及功能变化的过程中发现,氨基酸侧链和肽链骨架较易受到羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )的攻击,进而发生氧化脱氧使其结构发生变化、肽链断裂及其分子发生交联聚合而生成变性高聚物,使蛋白质功能性质发生较大的变化<sup>[10-11]</sup>。课题组在前期的试验中也发现乳清分离蛋白对 $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Asc}$ (铁/过氧化氢/抗坏血酸)氧化系统较为敏感<sup>[12]</sup>。因此,本研究将采用 $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Asc}$ (铁/过氧化氢/抗坏血酸)氧化系统,系统性研究其对乳清分离蛋白功能性变化的影响,以期为进一步阐明蛋白质氧化引起乳清分离蛋白功能性变化的机理奠定数据支撑,同时也为乳清分离蛋白在实际生产中提供控制其氧化的参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与仪器

乳清分离蛋白,购买于美国Davisco食品公司;盐酸、氯化钠、已二胺四乙酸(EDTA)、氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )、过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、抗坏血酸均为分析纯。

TA-XT plus型质构分析仪,英国Stable Micro System公司;RS-150流变仪,德国哈克公司;DK-98-1型电热恒温水浴锅,天津泰斯特仪器有限公司;PHS-3B精密酸度计,上海虹益仪器仪表有限公司;超纯水系统(Milli-Q Gradient),美国;紫外可见分光光度计(Cary 50 spectrophotometer),美国Varian公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Asc}$ (铁/过氧化氢/抗坏血酸)氧化系统的制备

该系统为羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )产生氧化系统(A hydroxyl radical-generating system, 简称为HRGS),主要由 $\text{FeCl}_3$ 、Asc和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 通过铁的氧化还原反应而产生。本实验主要设计两种氧化体系,均在浓度为50 mmol/L磷酸盐缓冲液中(pH值为6.0)。

##### 1.2.1.1 $\text{H}_2\text{O}_2$ 氧化体系

固定体系中 $\text{FeCl}_3$ 和Asc浓度,改变 $\text{H}_2\text{O}_2$ 浓度,即浓度为0.1 mmol/L  $\text{FeCl}_3$ 和0.1 mmol/L的Asc,  $\text{H}_2\text{O}_2$ 浓度分别选择1、5、10、15、20 mmol/L。

##### 1.2.1.2 $\text{FeCl}_3$ 氧化体系

固定体系中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和Asc浓度,改变 $\text{FeCl}_3$ 浓度,即浓度为10 mmol/L的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和1 mmol/L Asc,  $\text{FeCl}_3$ 浓度分别选择0.1、0.2、0.4、0.5和1 mmol/L。

#### 1.2.2 乳清分离蛋白的氧化反应

在上述氧化体系中分别加入乳清分离蛋白,使得蛋白的最终质量浓度为20 g/L。然后所有样品均在80 °C水浴锅中恒温氧化,分别被培养1、3、5 h,使乳清分离蛋白发生不同程度的氧化。通过添加BHA/Trolox/EDTA(使其最终浓度为1 mmol/L)来中止氧化反应。

#### 1.2.3 乳清分离蛋白功能性质及流变学的测定

经氧化后的乳清分离蛋白样品溶液在4 °C的双蒸水中透析48小时去除磷酸盐及未反应的物质,每隔4小时换一次双蒸水,透析后的样品超滤浓缩后再进行冷冻干燥并置于4 °C冷藏箱保藏备用。

乳化性及乳化稳定性的测定和起泡性及起泡稳定性的测定参考Bera和Mukherjee<sup>[13]</sup>报道的测定方法;溶解性的测定参考黄科礼等<sup>[14]</sup>报道的测定方法;持水性的测定参考Sosulski和Humbert<sup>[15]</sup>报道的测定方法;凝胶保水性的测定参考Salvador和Toldra<sup>[16]</sup>报道的测定方法。凝胶能力及流变学的测定方法参考崔旭海<sup>[17]</sup>报道的测定方法。

#### 1.2.4 数据分析

用Origin 7.5软件进行数据处理,并且用SAS 9.0统计软件进行差异显著性分析( $p \leq 0.05$ ),所有实验至少重复三次。

## 2 结果分析

### 2.1 蛋白质氧化对乳清分离蛋白乳化性能的

影响

蛋白质乳化性质的评价指标一般使用乳化活性指数 (EAI) 和乳化稳定性指数 (ESI)。它们可以反映蛋白质帮助形成乳化体系及其稳定乳化体系的能力大小。蛋白质通过降低界面张力帮助形成乳化体系。蛋白质通过增加吸附膜的黏度、空间位阻等各种因素来稳定乳化体系。

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 FeCl<sub>3</sub> 氧化系统对乳清分离蛋白的乳化活性及乳化稳定性的影响如图 1、图 2 所示。

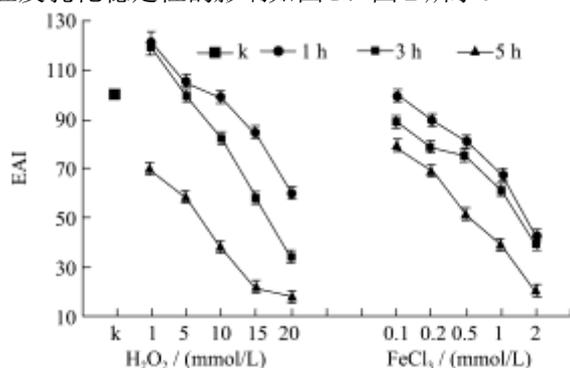


图 1 不同氧化系统对乳清分离蛋白乳化活性的影响

Fig.1 Effect of different oxidation systems on the emulsifying

property of whey protein isolates

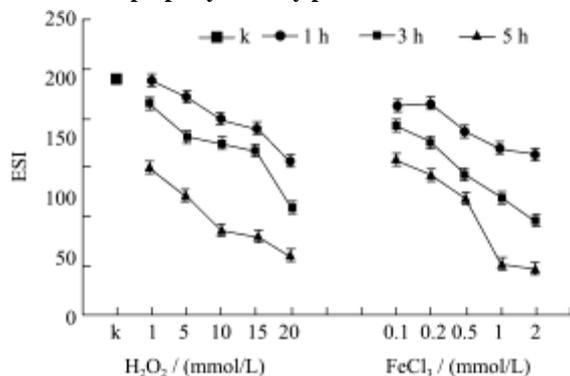


图 2 不同氧化系统对乳清分离蛋白乳化稳定性的影响

Fig.2 Effect of different oxidation systems on the stability of emulsifying property of whey protein isolates

从图 1、图 2 可以明显看出,随着氧化系统中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 FeCl<sub>3</sub> 的浓度的增加以及反应时间的延长,乳清分离蛋白的乳化活性及乳化稳定性都在不断的降低。在 5 h 氧化的时间下,较高浓度的氧化系统作用乳清分离蛋白,其乳化活性与空白相比下降了 50% 以上。

实验得出 ESI 和 EAI 有相同的下降趋势,说明乳清分离蛋白的乳化性能严重受到了两种氧化体系的影响。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 FeCl<sub>3</sub> 的加入使得蛋白质性质发生了一定程度的变性,破坏了蛋白质在界面吸附的功能结构,造成蛋白质于界面的作用力减弱,降低了乳清分离蛋白膜的黏度,从而导致乳清分离蛋白乳状液稳定性的

降低。李艳青<sup>[18]</sup>认为蛋白质氧化使得较大的蛋白质聚集体产生以致不能再形成稳定的界膜,变性蛋白与脂肪交联的能力下降,从而使其乳化性及乳化稳定性下降。

## 2.2 氧化引起的乳清分离蛋白起泡性及泡沫稳定性的变化

Fe/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Asc 氧化系统乳清分离蛋白起泡性和泡沫稳定性的影响如图 3 所示。从图中可知,被氧化的乳清分离蛋白的起泡性和泡沫稳定性的变化明显不同于对乳化性的影响。这是因为泡沫和乳状液的主要差别是在于分散相是气体还是脂肪,并且在泡沫体系中气体所占的体积百分数更大,气体体积与连续相的体积甚至可达 100:1,所以泡沫有很大的界面面积,界面张力也远大于乳化分散体系。

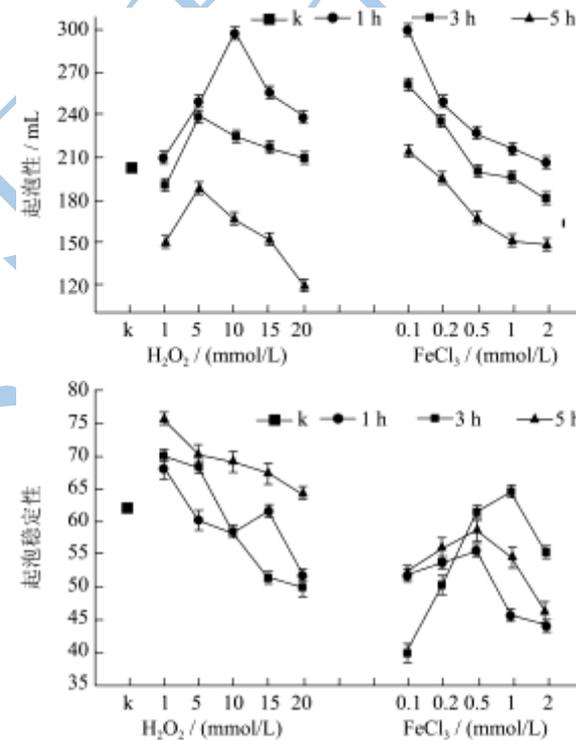


图 3 不同氧化系统对乳清分离蛋白起泡性及泡沫稳定性的影响

Fig.3 Effect of different oxidation systems on foaming property and the foaming stability of whey protein isolates

从图 3 可以看出,在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化系统中,随着 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度的增加,乳清分离蛋白的起泡性也随着不断的增加,但是在 1 h 的条件下,当浓度超过 10 mmol/L 时乳清分离蛋白起泡性呈现出明显下降的趋势;在 3 h, 5 h 的条件下,当浓度超过 5 mmol/L 时起泡性就呈现明显的下降趋势。在 FeCl<sub>3</sub> 氧化体系中,低浓度短时间的氧化所引起的起泡性的变化最为显著,从图中可

以明显看出, 0.1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> 氧化乳清分离蛋白 1 h 后起泡性达到最大, 泡沫所占体积达 300 mL。

总之, 蛋白质氧化显著影响了乳清分离蛋白的起泡性和泡沫稳定性, 低浓度短时间的氧化条件可以增强其起泡能力, 在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化体系中这种变化更为明显。

### 2.3 氧化引起的乳清分离蛋白溶解性、持水

能力及凝胶保水性的变化

不同氧化体系产生自由基对乳清分离蛋白持水能力、溶解度及其凝胶保水性的变化分别如图 4、图 5、图 6 所示。

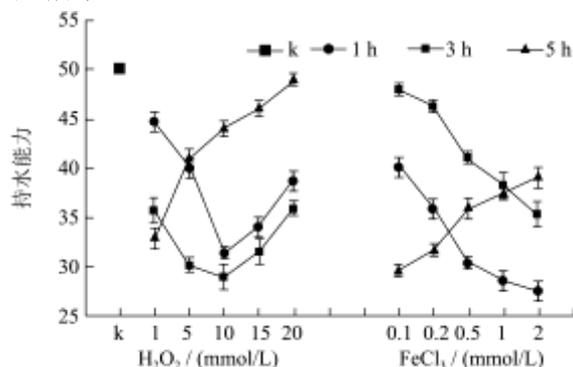


图 4 不同氧化体系对乳清分离蛋白持水能力的影响

Fig.4 Effect of different oxidation systems on the water holding capacity of whey protein isolates

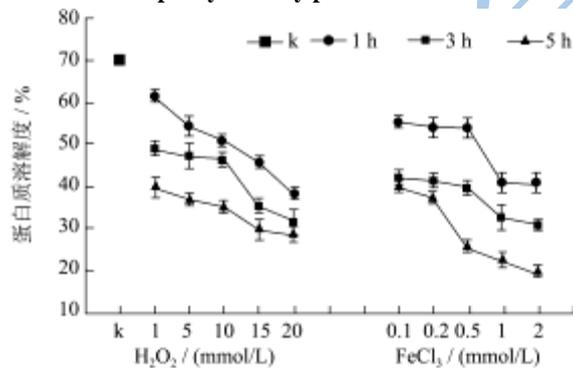


图 5 不同氧化体系对乳清分离蛋白溶解度的影响

Fig.5 Effect of different oxidation systems on the solubility of whey protein isolates

由图 4 可看出, 被不同氧化系统氧化乳清分离蛋白的持水能力与对照相比均有所下降。在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化体系中 1、3 h 氧化时持水能力先降低后升高, 在 10 mmol/L 浓度下达到最低值, 而在 5 h 氧化条件下, 持水能力缓慢升高, 但总体低于对照样品; 在 FeCl<sub>3</sub> 体系中 1、3 h 氧化条件下, 其持水能力缓慢下降, 在 5 h 氧化条件下同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化体系的变化相似, 但均低于对照样品。

如图 5 所示, 经两种氧化剂氧化的乳清分离蛋白的溶解度呈现出下降的趋势, 并且在 FeCl<sub>3</sub> 氧化体系中下降更快。这可能是因为蛋白质氧化降低了蛋白质溶液中溶剂的介电常数, 使得蛋白质分子之间的静电斥力减弱, 蛋白质分子之间的作用相对增加, 从而使得蛋白质发生聚集甚至产生沉淀, 致使降低了乳清分离蛋白的溶解度。

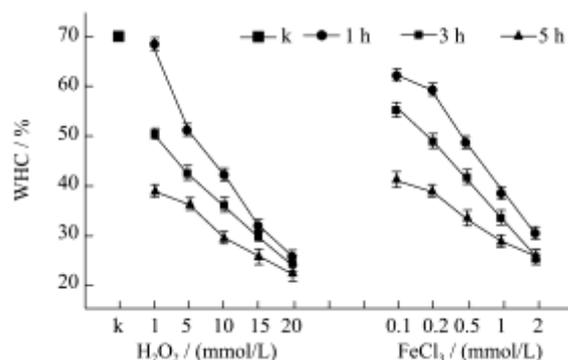


图 6 不同氧化体系对乳清分离蛋白凝胶保水性的影响

Fig.6 Effect of different oxidation systems on the gel water holding capacity of whey protein isolates

由图 6 可知, 随着氧化时间和氧化剂浓度的增加, 乳清分离蛋白的凝胶保水性也在不断的降低。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系与 FeCl<sub>3</sub> 体系相比, 前者对乳清分离蛋白的凝胶保水性影响要明显强于后者。FeCl<sub>3</sub> 浓度从 0.1 mmol/L 增加至 0.2 mmol/L 时凝胶保水性下降不明显, 在浓度增加至 2 mmol/L 时迅速下降。这可能是因为蛋白质氧化破坏了蛋白质-水之间形成的氢键, 降低了蛋白质与水之间的作用, 并且蛋白质氧化使得乳清分离蛋白发生变性和凝集, 降低了蛋白质的表面积和极性氨基酸与水结合的有效性。

### 2.4 氧化引起的乳清分离蛋白凝胶能力及流

变学性质的变化

胶凝是变性蛋白质发生的有序聚集反应。蛋白质胶凝后形成的产物是凝胶, 它具有三维网状结构, 可以容纳其他的成分和物质, 对食品的质地等方面具有重要作用。不同氧化体系对乳清分离蛋白氧化所引起的凝胶能力如图 7 所示。

从图 7 中可知乳清分离蛋白的凝胶硬度和弹性在不同氧化体系中都发生明显的降低。未氧化的乳清分离蛋白的凝胶硬度为 14.13 N, 在浓度为 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化体系中氧化 3 h 后, 乳清分离蛋白的硬度迅速下降, 与未氧化乳清分离蛋白相比降低了 92.3%; 1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> 氧化体系对乳清分离蛋白的凝胶硬度影响更大, 下降了 94.5%。这充分说明氧化系统氧化

剂浓度足够高,氧化时间足够长,乳清分离蛋白的硬度损失更严重。

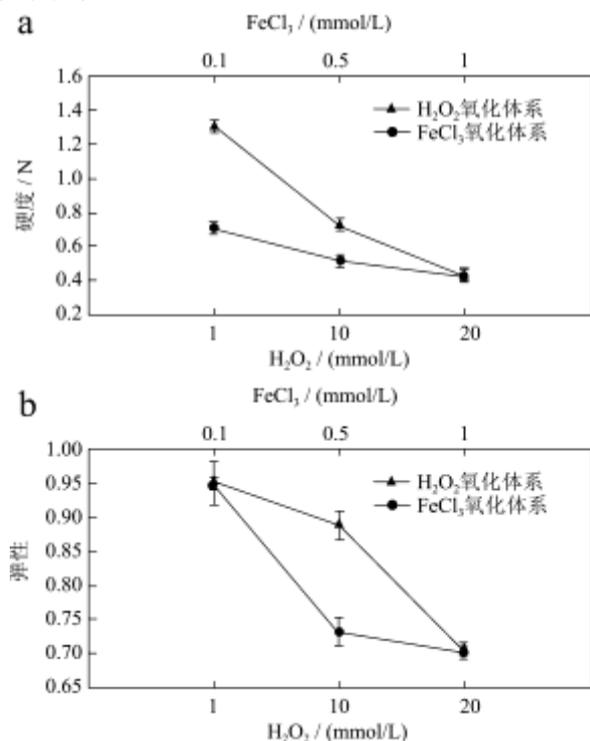


图7 不同氧化体系对乳清分离蛋白凝胶硬度和弹性的影响  
Fig.7 Effect of different oxidation systems on the gel hardness and elasticity of whey protein isolates

注: a: 硬度; b: 弹性。

由图 7b 可知,蛋白质氧化引起的乳清分离蛋白的凝胶弹性的变化与硬度相类似,图中曲线的走向趋势几乎一致。FeCl<sub>3</sub> 体系中弹性略高于 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系。未氧化乳清分离蛋白凝胶弹性为 0.976,在 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 及 1 mmol/L FeCl<sub>3</sub> 浓度下经 3 h 氧化后,弹性下降到 0.713 和 0.721,分别降低了 26.9%和 26.1%。因此,蛋白质氧化对乳清分离蛋白凝胶硬度及弹性都有严重的影响,而且呈现显著的下降的趋势,说明氧化对乳清分离蛋白的胶凝性质起到了很大的破坏作用。

为了确立蛋白氧化程度和凝胶形成能力之间的关系,被氧化的乳清分离蛋白通过动态的流变学测量来实现。G'值也称为弹性模量,它是描述固体材料抵抗形变能力的物理量,与凝胶强度中的弹性应具有很好的一致性;而复合模量 G\*表示物质总的硬度或刚性,与凝胶强度中的硬度具有很好的一致性。不同氧化条件下,乳清分离蛋白形成凝胶过程中贮藏模量(G')和复合模量(G\*)的变化如图 8 所示。

未氧化乳清分离蛋白的贮藏模量 (G') 和复合模量 (G\*) 分别为 8154 Pa 和 10890 Pa。经两种氧化体系氧化的乳清分离蛋白与未氧化的乳清分离蛋白相比,其贮藏模量 (G') 和复合模量 (G\*) 都表现出明

显的下降。

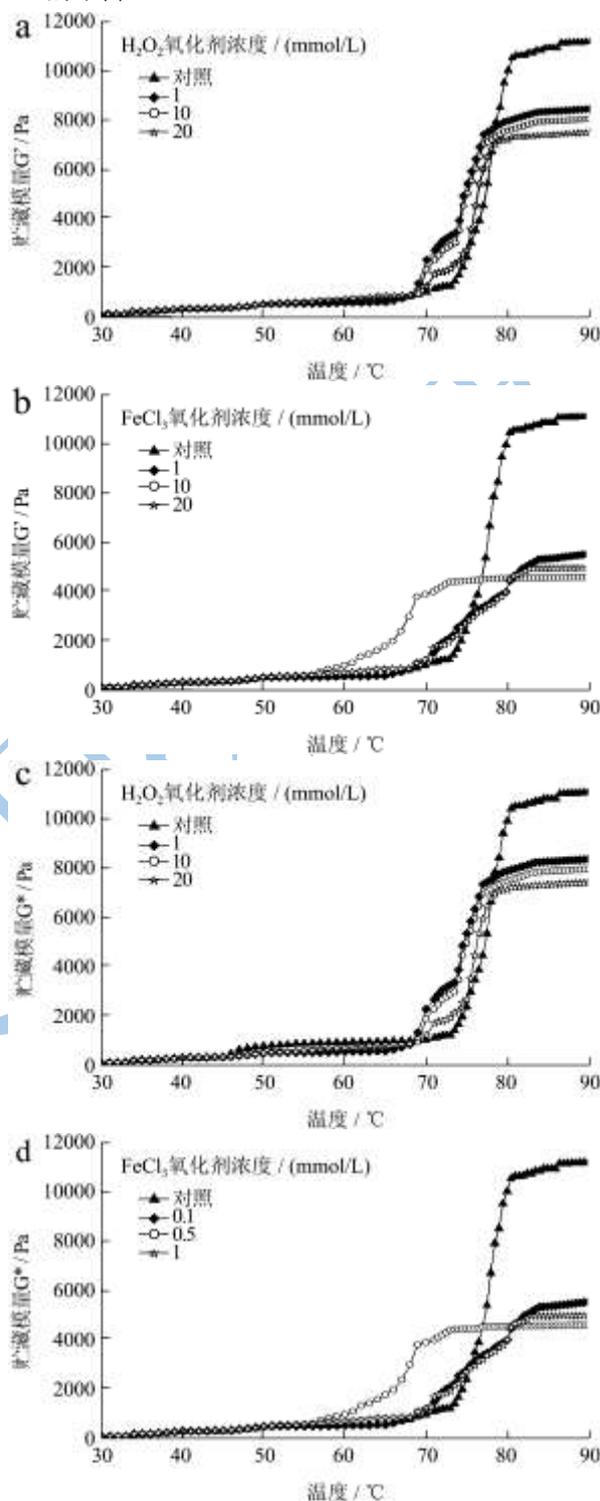


图8 不同氧化体系对乳清分离蛋白流变性质的影响

Fig.8 Effect of different oxidation systems on the rheology property of whey protein isolates

从图中可以明显看出,当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 20 mmol/L 时,贮藏模量 (G') 下降最快,降低了 33.79% (图 8a),当 FeCl<sub>3</sub> 浓度为 1 mmol/L 时,贮藏模量 (G') 值下降更明显,降低了 39.47% (图 8b); 同样对于贮藏模量 (G\*) 值,当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 20 mmol/L 时, G\* 值降低了

38.91% (图 8c); 当  $\text{FeCl}_3$  浓度为 1 mmol/L 时,  $G^*$  值降低 44.45% (图 8d)。

综上所述, 在  $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{FeCl}_3$  氧化体系中, 较高的氧化剂浓度严重影响了乳清分离蛋白的  $G'$  和  $G^*$  值, 特别是在  $\text{FeCl}_3$  氧化体系中尤为显著 ( $P < 0.05$ )。

在高浓度的氧化系统中, 使得乳清分离蛋白的空间结构受到了严重的破坏, 导致其功能性质也发生了较大的变化。蛋白质氧化引起的贮藏模量和复合模量的下降可能与前期研究得出的因蛋白质氧化导致其巯基和二聚酪氨酸含量的增加、游离氨基和总巯基含量降低有着密切的关系。蛋白质氧化可能降低了凝胶中二硫键的形成, 从而使得分子与分子之间和分子内部作用力发生变化。该结论与蛋白质氧化引起凝胶硬度和弹性的下降相一致。

### 3 结论

3.1 两种不同的氧化系统氧化乳清分离蛋白, 被氧化的乳清分离蛋白与未氧化的乳清分离蛋白相比, 乳化活性及其稳定性表现出明显的下降, 蛋白质溶解性、持水能力以及凝胶保水性都有不同程度的下降。 $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{FeCl}_3$  氧化体系对乳清分离蛋白的凝胶硬度、凝胶弹性和贮藏模量影响亦尤其显著, 其凝胶硬度、凝胶弹性、贮藏模量和复合模量分别降低了 94.5%, 26.9%、39.47% 和 44.45%。

3.2 崔旭海<sup>[7]</sup>在其论文中指出被氧化的乳清分离蛋白凝胶硬度降低了 90% 以上, 弹性降低了 20% 以上,  $G'$  值降低了 17% 以上,  $G^*$  值降低了 20% 以上。但是 Srinivasan 等<sup>[19]</sup>研究表明被氧化的蛋白质其凝胶强度显著增强。显然, 本试验结论与崔旭海报道的相一致, 与 Srinivasan 却相反。这可能是 Srinivasan 研究的鳕鱼蛋白与乳清分离蛋白的分子空间结构与构象不同导致的。其次多肽之间二硫键交联桥的形成有利于促进其三维网状结构的形成, 从而使蛋白质的凝胶强度增强。事实上, 在前期的试验中研究发现, 长时间高浓度的氧化条件使得乳清分离蛋白的巯基含量减少, 从而降低其二硫键的含量, 进而影响了二硫键交联桥的形成以致被氧化的乳清分离蛋白的凝胶强度下降。此外, 环境条件的不同也会引起结果存在差异, 本试验选择的氧化系统与他人相比可能更为剧烈, 具有足够的能量破坏蛋白质凝胶的形成。

3.3 综上所述, 长时间高浓度的氧化条件使得蛋白质的空间结构受到严重影响, 诸多功能性质发生较大的变化。因此, 在实际生产中应尽可能地控制蛋白氧化的发生, 以保持蛋白原来的特性, 减少其因为氧化所带来的营养损失或者降低其应用价值。

### 参考文献

- [1] Haraguchi FK, Silva ME, Neves LX, et al. Whey protein precludes lipid and protein oxidation and improves body weight gain in resistance-exercised rats [J]. *European Journal of Nutrition*, 2011, 50(5): 331-339
- [2] Teixeira KR, Silva ME, Neves LX, et al. Whey protein improves HDL/non-HDL ratio and body weight gain in rats subjected to the resistance exercise [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2012, 55(6): 943-950
- [3] Jervis S, Campbell R, Wojciechowski K, et al. Effect of bleaching whey on sensory and functional properties of 80% whey protein concentrate [J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(6): 2848-2862
- [4] Gad AS, Khadrawy YA, El-Nekeety AA, et al. Antioxidant activity and hepatoprotective effects of whey protein and Spirulina in rats [J]. *Nutrition*, 2011, 27(5): 582-589
- [5] Schaich K, Pryor W A. Free radical initiation in protein and amino acids by ionizing and ultraviolet radiations and lipid oxidation-Part III: Free radical transfer from oxidizing lipids [J]. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 1980, 13(3): 189-244
- [6] Oozumi T, Xiong Y. Identification of cross-linking site(s) of myosin heavy chains in oxidatively stressed chicken myofibrils [J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(3): C196-199
- [7] 崔旭海, 孔保华, 熊幼翎. 自由基氧化引起乳清蛋白溶解性、凝胶强度和乳化性变化的研究 [J]. *食品工业科技*, 2009, 2: 145-148
- [8] Cui Xuhai, Kong Baohua, Xiong Youling. Study on the solubilizing, gelling and emulsifying properties of whey protein isolate modified by a free radical-generating system [J]. *Journal of Science and Technology of food Industry*, 2009, 02: 145-148
- [8] 崔旭海. 羟基自由基氧化对乳清蛋白乳化性和起泡性的影响 [J]. *食品科技*, 2009, 8: 176-181
- [9] Cui Xu-hai. Influence of protein oxidation of whey protein isolate on emulsifying properties and foaming properties by a free radical-generating system [J]. *Journal of Food Science and Technolgy*, 2009, 8: 176-181
- [9] 孔保华, 孙妍, 熊幼翎. 抗氧化剂对羟自由基引起的乳清蛋白氧化抑制效果的研究 [J]. *食品科学*, 2010, 3: 5-10
- [9] Kong Bao-hua, Sun Yan, Xiong You-ling. Inhibition effect of antioxidants on whey protein oxidation caused by hydroxyl radical generation system [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 3: 5-10
- [10] Liu G, Xiong Y L. Electrophoretic pattern, thermal denaturation,

- and in vitro digestibility of oxidized myosin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48: 624-630
- [11] Liu G, Xiong Y L. Oxidatively induced chemical changes and interactions of mixed myosin,  $\beta$ -lactoglobulin, and soy 7S globulin [J]. Journal of the Science of Food and Agricultural, 2000, 80: 1601-1607
- [12] 田童童, 巩子路, 朱新荣, 等. 蛋白质氧化对乳清蛋白理化性质变化的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 11: 301-303  
Tian Tongtong, Gong Zilu, Zhu Xinrong, et al. Effect of protein oxidation on physicochemical properties of whey protein [J]. Journal of Jiang Su Agricultural Sciences, 2013, 11: 301-303
- [13] Bera M B, Mukherjee. Solubility, emulsifying and foaming properties of rice bran protein concentrates [J]. Journal of Food Science, 1989, 54(1): 142-145
- [14] 黄科礼, 尹寿伟, 杨晓泉. 微射流处理对红豆分离蛋白结构及功能特性的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 9: 1062-1065  
Huang Keli, Yin Shouwei, Yang Xiaoquan. Effect of micro-fluidization treatment on conformational and functional properties of red bean (*Phaseolus angularis*) protein isolates [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 9: 1062-1065
- [15] Sosulski F W, Humbert E S. Functional properties of rapeseed flours, concentrates and isolates [J]. Journal of Food Science, 1976, 46: 1349-1353
- [16] Salvador P, Toldra M, Saguier E, et al. Microstructure-function relationships of heat-induced gels of porcine haemoglobin [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1654-1659
- [17] 崔旭海. 羟基自由基氧化对乳清蛋白凝胶流变性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(3): 40-45  
Cui Xu-hai. The influence of free hydroxyl-radicals oxidation on whey protein gels rheological properties [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(3): 40-45
- [18] 李艳青. 蛋白质氧化对鲤鱼蛋白结构和功能性的影响及其控制技术[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013  
Li Yanqing. Protein Oxidation-induced structure and function changes of common carp (*Cyprinus carpio*) protein and its control technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013
- [19] Srinivasan S, Hultin H O. Chemical, physical, and Functional properties of cod proteins modified by a nonenzymic free-radical-generating system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45: 310-320