

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80670

# 氯化钠对猪血浆蛋白功能及结构特性的影响

王德强<sup>1</sup> 赵龙源<sup>2</sup> 唐怀建<sup>3</sup> 马一豪<sup>2</sup> 贾峰<sup>2</sup>

(1. 商丘市产品质量检验检测中心, 河南 商丘 476000; 2. 河南工业大学生物工程学院, 河南 郑州 450001;  
3. 河南工业大学粮食和物资储备学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** [目的] 探究氯化钠对猪血浆蛋白功能及结构特性的影响。[方法] 采用不同浓度(0~1.0 mol/L)氯化钠对猪血浆蛋白进行处理, 通过紫外分光光度计、激光粒度分析仪、Zeta-电位分析仪等测定猪血浆蛋白功能及结构特性的变化。[结果] 氯化钠促进了猪血浆蛋白的溶解度, 并在 0.2 mol/L 时达到峰值, 随着氯化钠浓度的进一步增加, 溶解度呈下降趋势, 猪血浆蛋白的表面疏水性及乳化性的变化趋势在 0.8 mol/L 时出现了转折, 最大升高比例分别为 69.75% 和 23.88%, 氯化钠对猪血浆蛋白的起泡性产生了不利影响, 表现为起泡能力的下降; 此外, 与对照组相比, 猪血浆蛋白的持水性降低, 最大降幅达到 40.18%, 而持油性和浊度增加, 最高增幅分别为 50.22% 和 37.93%; 结构特性方面的变化表现为猪血浆蛋白的紫外吸收光谱出现蓝移, 平均粒径增大, Zeta 电位绝对值及自由巯基含量减少, 表明氯化钠促进了猪血浆蛋白分子间的紧密结合, 从而导致蛋白结构特性的改变。[结论] 氯化钠可使猪血浆蛋白质分子间的相互作用增强, 从而改变蛋白质的结构特性, 进而达到调控其功能特性。

**关键词:** 猪血浆蛋白; 氯化钠; 溶解度; 乳化性; 起泡性; Zeta 电位

## Effects of sodium chloride treatment on the functional characteristics and structure of porcine plasma protein

WANG Deqiang<sup>1</sup> ZHAO Longyuan<sup>2</sup> TANG Huaijian<sup>3</sup> MA Yihao<sup>2</sup> JIA Feng<sup>2</sup>

(1. Shangqiu Product Quality Inspection and Testing Center, Shangqiu, Henan 476000, China;  
2. College of Bioengineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;  
3. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of sodium chloride (NaCl) on the functional and structural properties of porcine plasma proteins (PPP), with the aim of providing a reference for the practical application of PPP. [Methods] PPP was treated with different concentrations of NaCl (0~1.0 mol/L), and changes in its functional and structural properties were measured using ultraviolet-visible spectrophotometry, laser particle size analysis, and Zeta potential analysis. [Results] NaCl promoted the solubility of PPP, reaching a peak at 0.2 mol/L. With further increases in NaCl concentration, solubility showed a downward trend. The trends in surface hydrophobicity and emulsifying properties of PPP changed at 0.8 mol/L, with maximum increases of 69.75% and 23.88%, respectively. NaCl had a negative effect on the foaming ability of PPP, as evidenced by a reduction in foam formation. In addition, compared with the control, the water-holding capacity of PPP decreased, with a maximum reduction of 40.18%, while the oil-holding capacity and turbidity increased, with maximum increases of 50.22% and 37.93%, respectively. In terms of structural characteristics, the UV absorption spectrum of PPP exhibited a blue shift, the average particle size increased, and both the absolute value of Zeta potential and the free sulfhydryl content decreased. These findings indicate that NaCl facilitated intermolecular interactions among PPP molecules, thereby altering their structural properties. [Conclusion] NaCl can enhance intermolecular interactions among PPP molecules, leading to changes in protein structure and thus

基金项目: 商丘市产品质量检验检测中心科研项目(编号: 2024001)

通信作者: 贾峰(1974—), 男, 河南工业大学副教授, 博士。E-mail: mrjiafeng@163.com

收稿日期: 2024-07-15 改回日期: 2025-04-07

引用格式: 王德强, 赵龙源, 唐怀建, 等. 氯化钠对猪血浆蛋白功能及结构特性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 24-31.

Citation: WANG Deqiang, ZHAO Longyuan, TANG Huaijian, et al. Effects of sodium chloride treatment on the functional characteristics and structure of porcine plasma protein[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 24-31.

regulating their functional properties.

**Keywords:** porcine plasma protein (PPP); sodium chloride; solubility; emulsifying properties; foaming; Zeta potential

猪血是中国消费量最大的血产品之一,其蛋白质含量高,并含有多种氨基酸,其中赖氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和缬氨酸含量最为丰富<sup>[1]</sup>。血浆蛋白是猪血主要的蛋白成分,因其均衡的氨基酸组成和多种功能性质(如凝胶性、乳化性、起泡性和持水性等)被视为优质蛋白源,在生物医学、食品工业等领域有着广泛的应用。猪血浆中富含纤维蛋白原、白蛋白、球蛋白及凝血因子等多种活性蛋白成分<sup>[2]</sup>。蛋白的功能特性对食品加工过程有重要影响,与其来源、加工条件及环境条件如温度、离子种类或离子强度等密切相关<sup>[3]</sup>。蛋白质所处的溶液环境对其功能发挥以及构象变化有重要影响<sup>[4]</sup>,而且溶剂环境也是蛋白质能够正确发挥生物功能的基础<sup>[5]</sup>。

氯化钠对蛋白质功能和结构具有显著影响,已成为国内外研究的热点。氯化钠的加入可以显著改变蛋白质的功能特性。例如,氯化钠能改善全蛋液的溶解性、起泡性和乳化性<sup>[6]</sup>;在红毛丹种子白蛋白中,添加氯化钠对起泡性、泡沫稳定性、乳化性和乳化稳定性也有显著影响<sup>[7]</sup>。此外,在蛋白质复合体系中,氯化钠可降低净电荷和表面张力,增加蛋白质的表面疏水性,从而优化婴儿配方奶粉蛋白质的功能特性<sup>[8]</sup>。氯化钠对猪血浆蛋白功能特性及结构特性同样也具有重要影响。在不同加热时间、加热温度及氯化钠含量处理条件下,氯化钠对猪血凝胶的回复性和持水力的影响最显著<sup>[9]</sup>。此外,猪血浆蛋白的质量浓度、pH值、离子强度和离子种类也会显著影响其热诱导凝胶的硬度、黏附性和持水性,氯化钠的加入进一步增强了凝胶的硬度<sup>[10]</sup>。然而,随着氯化钠浓度的增加,猪血浆蛋白水解物的乳状液物理稳定性和氧化稳定性显著降低<sup>[11]</sup>。这些研究为探索氯化钠在蛋白质结构功能调控中的作用机制及实际应用提供了重要参考。

关于猪血浆蛋白的功能特性等方面已有相关研究,但尚不够全面,系统探讨氯化钠浓度对猪血浆蛋白功能和结构特性的影响的研究尚属空白。研究拟在前人工作的基础上,进一步引入持水性、持油性、粒径分布、Zeta电位、紫外吸收光谱等指标,系统分析氯化钠浓度对猪血浆蛋白功能特性及结构特性的影响,以期更全面揭示氯化钠的调控机制,为猪血浆蛋白功能开发及实际应用提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

喷雾干燥猪血浆蛋白粉:水分含量6.71%,蛋白含量79.6%,灰分含量8.1%,中科世生(河南)生物科技有限公司;

氯化钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

三羟甲基氨基甲烷(Tris):分析纯,天津市科密欧化

学试剂有限公司;

十二烷基硫酸钠(SDS):分析纯,北京索莱宝科技有限公司;

乙二胺四乙酸(EDTA)、5,5-二硫代-双-(2-硝基苯甲酸)(DTNB):分析纯,杭州齐誉生物科技有限公司;

尿素:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

大豆油:益海嘉里(武汉)粮油工业有限公司。

### 1.2 仪器与设备

离心机:Multifuge X1R型,美国Thermo公司;

可调式混匀仪:MX-S型,大龙兴创实验仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV 1901型,上海奥析科学仪器有限公司;

超微量紫外分光光度计:Nano Drop 2000型,赛默飞世尔科技有限责任公司;

紫外可见分光光度计:UV-2800A扫描型,尤尼科(上海)仪器有限公司;

激光粒度分析仪:MS 3000型,英国马尔文仪器有限公司;

Zeta-电位分析仪:Nano ZS90型,英国马尔文仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:DK-S24型,上海精宏实验设备有限公司;

电子天平:JJ124BC型,常熟双杰测试仪器厂;

高速分散器:XHF-DY型,宁波新芝生物科技股份有限公司。

### 1.3 方法

1.3.1 猪血浆蛋白溶液制备 称取一定量的猪血浆蛋白粉,分别溶解在氯化钠浓度为0.02、0.4、0.6、0.8、1.0 mol/L的磷酸盐缓冲液(0.02 mol/L, pH 7)中,涡旋振荡5 min配成所需浓度的蛋白溶液,研究氯化钠浓度对猪血浆蛋白功能及结构特性的影响。

1.3.2 蛋白溶解度检测 参考周晓配等<sup>[12]</sup>和Meenmanee等<sup>[13]</sup>的方法并稍作修改。取1 mL质量分数为1.0%的蛋白溶液,计算总蛋白含量,8 000 r/min离心15 min,取上清液,使用超微量紫外分光光度计在280 nm下测定吸光值,计算上清液中蛋白含量,按式(1)计算蛋白溶解度。

$$S = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——溶解度,%;

$m_1$ ——上清液蛋白含量,g;

$m_0$ ——总蛋白含量,g。

1.3.3 蛋白疏水性检测 参考杨川等<sup>[14]</sup>的方法并稍作修改。称取0.1 g猪血浆蛋白加入10 mL 0.02 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.0),涡旋振荡10 min制成悬浮液,采用1 mL

磷酸盐缓冲液(不加蛋白为对照组;加蛋白为样品组)与 200  $\mu\text{L}$  1 mg/mL 溴酚蓝溶液混合,涡旋振荡 2 min, 4 000 r/min 离心 10 min,上清液稀释 10 倍,以磷酸盐缓冲液为空白,用紫外可见分光光度计在 595 nm 下测定上清液吸光度。由于表面疏水性与溴酚蓝的结合量成正比,因此表面疏水性用溴酚蓝结合量表示。按式(2)计算表面疏水性。

$$H = 200 \times \frac{A_{\text{对照}} - A_{\text{样品}}}{A_{\text{样品}}}, \quad (2)$$

式中:

$H$ ——疏水性,  $\mu\text{g}$ ;

$A_{\text{对照}}$ ——对照组的吸光度;

$A_{\text{样品}}$ ——样品组的吸光度。

1.3.4 蛋白浊度测定 参考江连洲等<sup>[15]</sup>的方法。

1.3.5 蛋白起泡性和泡沫稳定性检测 参考 He 等<sup>[16]</sup>的方法。

1.3.6 蛋白乳化性及乳化稳定性检测 参考曾琪等<sup>[17]</sup>和张聪聪<sup>[18]</sup>的方法并稍作修改。准确称取 0.1 g 猪血浆蛋白粉溶于磷酸盐缓冲溶液中,配制成 10 mg/mL 的蛋白溶液,室温下磁力搅拌 30 min,取 9 mL 蛋白溶液与 3 mL 大豆油混匀,10 000 r/min 高速匀化 2 min,第 0 min 时立刻从底部 0.5 cm 处吸取 50  $\mu\text{L}$  溶液,转移到含有 5 mL 0.1% SDS 溶液的离心管中混匀,使用紫外可见分光光度计在 500 nm 处测其吸光度;在室温条件下静置 30 min 后,从乳液底部再吸取 50  $\mu\text{L}$  加入 5 mL 0.1% SDS 溶液的离心管中混匀,在 500 nm 处测其吸光度,分别按式(3)和式(4)计算蛋白乳化性(EAI)和乳化稳定性(ESI)。

$$I_{\text{EA}} = \frac{A_0 \times N}{10\,000 \times \varphi \times C} \times 2 \times T, \quad (3)$$

式中:

$I_{\text{EA}}$ ——乳化性,  $\text{m}^2/\text{g}$ ;

$A_0$ ——乳化液均质后第 0 min 时测得的吸光度;

$N$ ——稀释倍数, 101;

$\varphi$ ——乳化液的油相体积分数(油的体积/乳化体系的体积), %;

$C$ ——形成乳化液之前的蛋白质质量浓度, g/mL;

$T$ ——阿伦尼乌斯常数, 2.303。

$$I_{\text{ES}} = \frac{A_{30}}{A_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$I_{\text{ES}}$ ——乳化稳定性, %;

$A_{30}$ ——乳化液均质后静置 30 min 时测得的吸光度;

$A_0$ ——乳化液均质后第 0 min 时测得的吸光度。

1.3.7 蛋白持水性和持油性检测 参考 Deng 等<sup>[19]</sup>的方法。

1.3.8 蛋白紫外吸收光谱分析 参考张艳艳等<sup>[20]</sup>的方法并稍作修改。准确称量 0.02 g 蛋白样品,加入 20 mL 0.01 mol/L pH 7.0 的磷酸盐缓冲溶液,配制成质量浓度为

1.0 mg/mL 的蛋白悬浮液,使用涡旋振荡器将蛋白悬浮液振荡 2 min 充分混匀,4 000 r/min 离心 15 min,取上清液,用紫外可见分光光度计对其进行紫外吸收光谱扫描,扫描参数:范围 200~400 nm,速度 60 nm/min,光程 1.0 cm,狭缝宽度 0.2 nm,以磷酸盐缓冲溶液作为参比进行基线校准。

1.3.9 蛋白粒径及 Zeta 电位测定 参考王冰等<sup>[21]</sup>的方法。

1.3.10 蛋白自由巯基含量测定 参考 Jia 等<sup>[22]</sup>的方法。

1.3.11 圆二色谱测定 参考 Kim<sup>[23]</sup>的方法。

1.3.12 数据处理 所有试验至少重复 3 次,结果以均值士标准差表示,利用 SPSS 22 软件进行单因素方差分析,各水平处理之间用 Duncan's 显著性分析( $P < 0.05$ ),采用 Origin 软件绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 氯化钠对猪血浆蛋白功能特性的影响

2.1.1 氯化钠对猪血浆蛋白溶解度、疏水性和浊度的影响 由图 1(a)可知,对照组的溶解度为 40.11%,氯化钠浓度为 0.2 mol/L 时溶解度最大,为 43.10%;氯化钠浓度为 0.2~1.0 mol/L 时,溶解度逐渐下降且差异显著( $P < 0.05$ );当氯化钠浓度为 1.0 mol/L 时溶解度最小(为 30.00%),与对照组相比下降了 25.21%。表明随着氯化钠浓度逐渐增加蛋白的溶解度减小,可能是适量的盐离子加入到蛋白溶液中,蛋白质会发生盐溶作用使蛋白的溶解度增加<sup>[24]</sup>,随着氯化钠浓度的继续增加,破坏了双电层的水化膜,导致蛋白分子聚集沉淀,溶解度下降。

由图 1(b)可知,对照组的表面疏水性为 18.71  $\mu\text{g}$ ,在氯化钠浓度为 0.8 mol/L 时表面疏水性达到最高(为 31.76  $\mu\text{g}$ ),与对照组相比升高了 69.75%;氯化钠浓度为 0~0.8 mol/L 时表面疏水性差异显著( $P < 0.05$ ),在 1.0 mol/L 时表面疏水性为 25.57  $\mu\text{g}$ 。表明添加氯化钠可增加蛋白的表面疏水性,可能是氯化钠能改变蛋白的表面结构,使其表面疏水基团暴露,从而增加了疏水基团与溴酚蓝的结合量<sup>[25]</sup>。

由图 1(c)可知,对照组的浊度为 0.29,氯化钠浓度在 1.0 mol/L 时浊度最高(为 0.40),与对照组相比升高了 37.93%;氯化钠浓度为 0~1.0 mol/L 时浊度差异显著( $P < 0.05$ )。表明添加氯化钠增加了蛋白的浊度,可能是氯化钠会破坏蛋白质的电离层结构,蛋白质分子稳定性减小,容易发生变性聚集,大分子可溶性聚集体增多,使光发生散射,进而导致蛋白溶液的浊度升高;也可能是由于蛋白质分子在溶液中形成了可溶性聚集体,疏水基团暴露增加了蛋白质与水分子的相互作用面积,同时氯化钠屏蔽了静电作用,稳定了这些聚集体,尽管浊度升高,但聚集体保持溶解状态,因此溶解度并未下降。贾宝环等<sup>[26]</sup>的研究也表明,氯化钠能促使蛋白之间的相互作用,导致浊度显著升高。

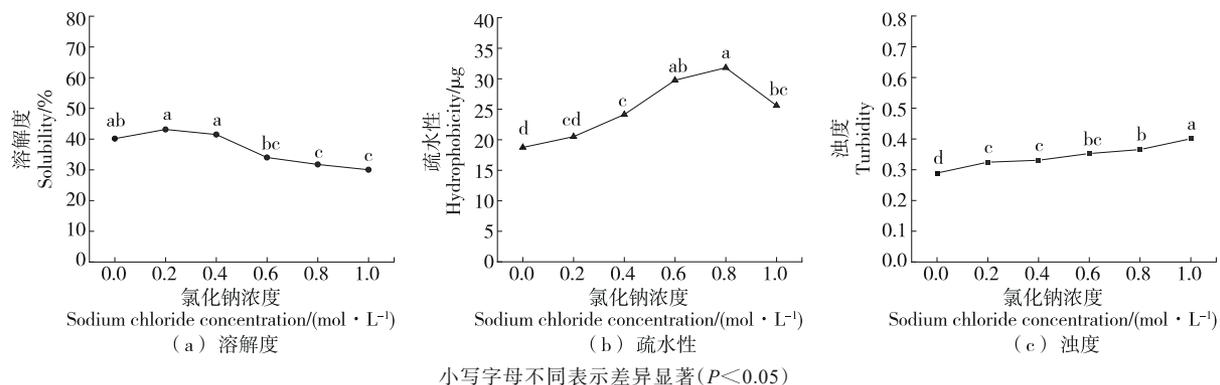


图1 氯化钠对猪血浆蛋白溶解度、疏水性和浊度的影响  
Figure 1 Effects of NaCl concentration on solubility, hydrophobicity, and turbidity of PPP

2.1.2 氯化钠对猪血浆蛋白起泡性和泡沫稳定性的影响 由图2(a)可知,对照组的猪血浆蛋白起泡性为48.33%,氯化钠浓度在0.2 mol/L时起泡性达到最高(为51.67%),与对照组相比升高了6.91%;氯化钠浓度为0.2~1.0 mol/L时起泡性显著下降( $P<0.05$ ),当氯化钠浓度为1.0 mol/L时起泡性较对照组下降了31.80%。表明添加氯化钠降低了蛋白的起泡性,可能是氯化钠的加入影响蛋白质的展开和聚集,进而会破坏泡沫的生成,氯化钠浓度 $<0.2$  mol/L时,氯化钠解离出的离子在溶液中与蛋白质表面的电荷发生中和反应,增加了蛋白分子之间的相互作用,促进膜结构致密化,增加厚度,起泡性增加。刘磊等<sup>[27]</sup>的研究也发现,随着氯化钠浓度的增加,椰子蛋白的起泡性先增加后下降。

由图2(b)可知,对照组静置15 min时的泡沫稳定性为89.57%,随后逐渐减小,到180 min时泡沫稳定性最低(为61.96%),与15 min时相比下降了30.83%;当氯化钠浓度为0.2,0.6 mol/L时,泡沫稳定性整体比较好,而氯化钠浓度为0.4,0.8,1.0 mol/L时,泡沫稳定性相对较低。表明氯化钠浓度对泡沫稳定性的影响是波动的,可能是氯

化钠浓度影响表面吸附膜的坚固性,从而影响到液膜的强度变化<sup>[28]</sup>,导致蛋白发生变性聚集沉淀,溶解度降低,界面蛋白的黏度降低,因而蛋白的泡沫稳定性变差。

2.1.3 氯化钠对猪血浆蛋白乳化性和乳化稳定性的影响 由图3可知,对照组的乳化性为51.42 m<sup>2</sup>/g,氯化钠浓度在0.8 mol/L时乳化性最好(为63.70 m<sup>2</sup>/g),与对照组相比升高了23.88%,氯化钠浓度为1.0 mol/L时乳化性最差(为39.70 m<sup>2</sup>/g)且显著低于对照组的( $P<0.05$ );对照组的乳化稳定性为89.17%,氯化钠浓度为0.4 mol/L时乳化稳定性最高(达到89.76%),氯化钠浓度为1.0 mol/L时乳化稳定性最小。表明添加氯化钠导致蛋白质表面的电荷发生改变,蛋白质溶解度增加,更多疏水性基团的暴露加速蛋白质分子扩散到水油界面与油脂相互作用,乳化活性和稳定性增加;而且盐离子也可压缩胶体的扩散双电层厚度,从而降低了乳状液的稳定性<sup>[29]</sup>。顾楠等<sup>[30]</sup>在研究不同浓度的氯化钠对鹰嘴豆分离蛋白乳化性和乳化稳定性时也得到了类似的结果。

2.1.4 氯化钠对猪血浆蛋白持水性和持油性的影响 由图4可知,对照组的持水性为2.24 g/g,氯化钠浓度为0~

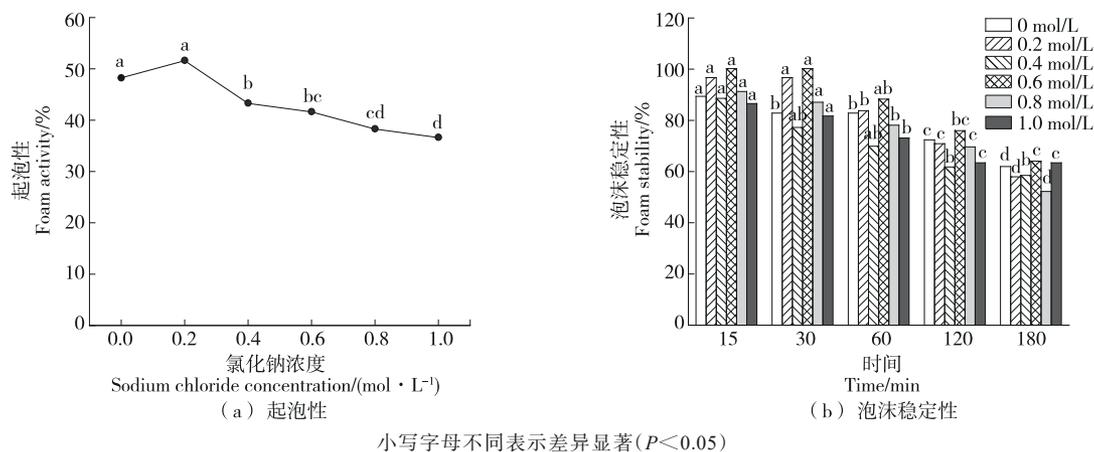


图2 氯化钠对猪血浆蛋白起泡性和泡沫稳定性的影响  
Figure 2 Effects of NaCl concentration on foam activity and foam stability of PPP

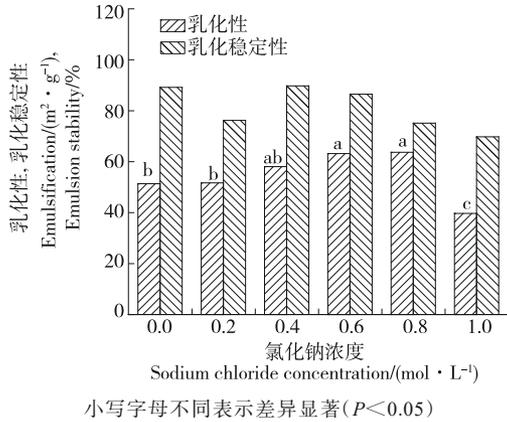


图3 氯化钠对猪血浆蛋白乳化性和乳化稳定性的影响  
Figure 3 Effects of NaCl concentration on emulsification and emulsion stability of PPP

0.2 mol/L 时持水性差异显著 ( $P < 0.05$ ), 当氯化钠浓度为 1.0 mol/L 时持水性达到最小值, 与对照组相比下降了 40.18%; 对照组的持油性为 3.32 g/g, 随氯化钠浓度增加持油性增大, 当氯化钠浓度为 1.0 mol/L 时持油性达到最大值, 较对照组上升了 50.22%。表明氯化钠的添加降低了蛋白的持水性而持油性升高, 可能是氯化钠的加入使溶液中蛋白之间的静电荷效应减弱, 改变了蛋白的结构, 亲水基团被破坏, 疏水性基团暴露于分子表面, 降低了水与蛋白质的结合。添加氯化钠可能使蛋白的空间结构被破坏, 蛋白内部空隙变大, 非极性氨基酸被暴露出来, 使得非极性氨基酸侧链与更多的脂肪烃侧链结合, 更有利于油相的物理保留, 增大了油的吸附能力, 提高了蛋白的持油性<sup>[31]</sup>。这与张春雪等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。

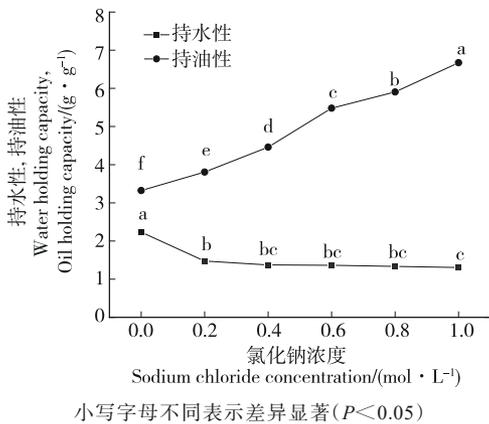


图4 氯化钠对猪血浆蛋白持水性和持油性的影响  
Figure 4 Effects of NaCl concentration on water-holding and oil-holding capacities of PPP

2.2 氯化钠对猪血浆蛋白结构的影响

2.2.1 氯化钠对猪血浆蛋白紫外吸收光谱的影响 由图5可知, 对照组的吸光度为 0.75, 氯化钠浓度为 1.0 mol/L 时

吸光度最大 (为 0.94), 与对照组相比升高了 20.21%, 经过氯化钠处理后的猪血浆蛋白紫外扫描光谱的峰形变化不明显, 但有明显的波峰位移, 即最大吸收峰向左偏移发生了蓝移现象, 最大吸收峰的强度发生变化。由于氨基酸肽键对紫外线的吸收, 肽链上的色氨酸、酪氨酸的杂芳环  $\pi \rightarrow \pi^*$  和  $n \rightarrow \pi^*$  跃迁, 使蛋白质具有吸收紫外光的性质, 在 280 nm 左右处出现吸收峰<sup>[33]</sup>, 而添加氯化钠使蛋白的紫外吸收强度增强, 可能是由于氯化钠的引入使蛋白空间结构发生变化, 导致了蛋白内部某些区域的构象调整, 进而改变了蛋白中的色氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸等侧链具有高疏水性的氨基酸的微环境, 使蛋白疏水性提高, 更多的疏水氨基酸暴露在蛋白质分子表面<sup>[34]</sup>。王启明等<sup>[35]</sup>发现, 随着氯化钠浓度的增加, 紫外特征吸收峰会逐渐增强。

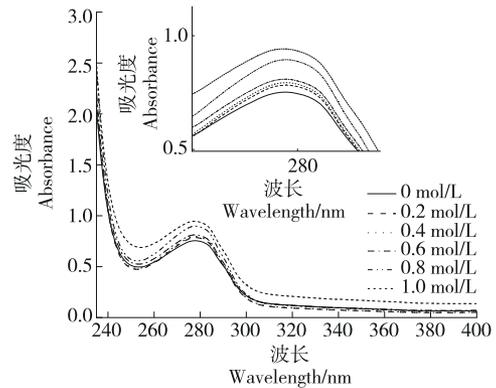


图5 氯化钠对猪血浆蛋白紫外吸收光谱的影响  
Figure 5 Effects of NaCl concentration on the UV absorption spectrum of PPP

2.2.2 氯化钠对猪血浆蛋白平均粒径和 Zeta 电位的影响 由图 6(a) 和图 6(b) 可知, 对照组的平均粒径为 127.47 nm, 氯化钠浓度在 0.2 mol/L 时升高至 148.90 nm, 升高了 16.81%; 氯化钠浓度在 0.4~0.8 mol/L 时平均粒径差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但与对照组相比分别增大了 17.78%, 18.91%, 22.20%; 氯化钠浓度为 1.0 mol/L 时平均粒径达到最大值, 为 156.40 nm。表明添加氯化钠使蛋白的平均粒径增大, 可能是在蛋白溶液中加入氯化钠, 由于盐离子的存在, 使蛋白微环境中的电荷产生屏蔽作用, 导致水化层被破坏, 影响蛋白质表面疏水作用, 分子间斥力减小。同时, 离子强度的增加相当于减少蛋白质的净电荷密度, 随着氯化钠浓度的增大, 分子表面电荷数减少, 热力学稳定性下降, 蛋白质分子发生聚集, 蛋白平均粒径增大。

由图 6(c) 可知, 对照组的 Zeta 电位为 -6.68 mV, 氯化钠浓度在 0.2 mol/L 时为 -6.43 mV, 在 0.4~1.0 mol/L 时 Zeta 电位分别为 -5.81, -5.37, -5.27, -4.99 mV, 与对照组相比分别减小了 13.02%, 19.61%, 21.11%, 25.30%

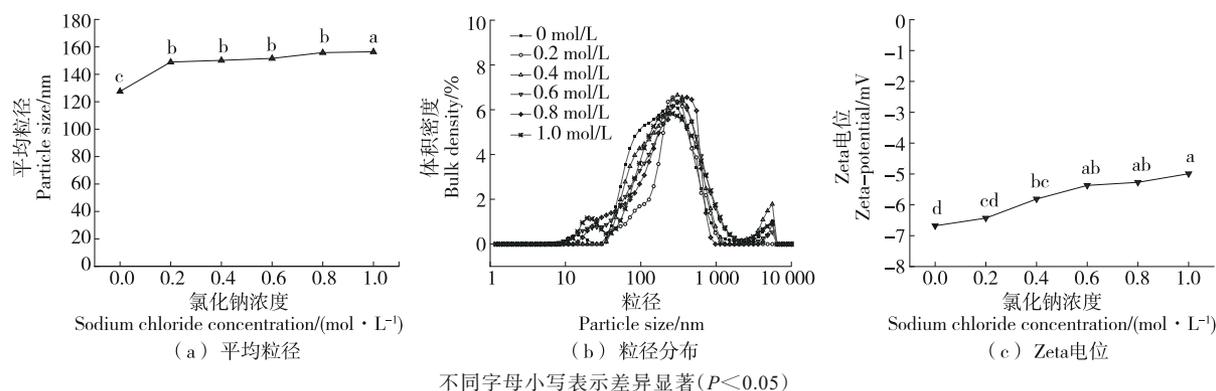


图6 氯化钠对猪血浆蛋白平均粒径、粒径分布和Zeta电位的影响

Figure 6 Effects of NaCl concentration on mean particle size, particle size distribution, and Zeta potential of PPP

( $P < 0.05$ ),随着氯化钠浓度的升高,Zeta电位绝对值呈减小趋势。表明氯化钠的加入导致Zeta电位绝对值变小,可能是离子强度能够改变蛋白表面电荷,且电荷的变化较明显,氯化钠的加入使蛋白产生了电荷屏蔽效应,表面所带的负电荷变小,从而使Zeta电位绝对值减小。袁江兰等<sup>[36]</sup>发现,大米谷蛋白Zeta电位绝对值随着氯化钠浓度的增加也呈减小趋势。

2.2.3 氯化钠对猪血浆蛋白自由巯基的影响 由图7可知,对照组的自由巯基含量为 $3.30 \mu\text{mol/g}$ ,氯化钠浓度为 $0\sim 0.4 \text{ mol/L}$ 时自由巯基含量差异不显著( $P > 0.05$ ),氯化钠浓度为 $1.0 \text{ mol/L}$ 时自由巯基含量达到最小值且显著低于对照组的( $P < 0.05$ )。表明添加氯化钠使蛋白的自由巯基含量减少,可能是在不同浓度氯化钠的作用下,疏水性基团暴露增加,蛋白质表面疏水性增加,导致疏水性聚集,且高浓度的氯化钠会使蛋白质发生严重变性,使其巯基转化为二硫键;也可能是氯化钠中的离子会影响蛋白分子间的二硫键稳定性,促进二硫键的断裂与巯基之间的相互转化,使原本埋藏在蛋白分子内部的巯基暴露至表面,从而增加了自由巯基的数量,改变了蛋白质的空间结构,结构得到伸展。

2.2.4 氯化钠对猪血浆蛋白二级结构的影响 由图8可知, $\alpha$ -螺旋含量随着氯化钠浓度的增加先减少,在氯化钠浓度为 $0.6 \text{ mol/L}$ 时达到最低(为18%),随后又逐渐增加,在氯化钠浓度为 $1.0 \text{ mol/L}$ 时达到最高(为24%); $\beta$ -折叠含量随着氯化钠浓度的增加先增加,在氯化钠浓度为 $0.6 \text{ mol/L}$ 时达到最高(为34%),随后又逐渐减少,在氯化钠浓度为 $1.0 \text{ mol/L}$ 时达到最低(为26%)。 $\alpha$ -螺旋含量和 $\beta$ -折叠含量呈负相关,相关系数为 $-0.9769$ ;无规卷曲含量与 $\beta$ -转角含量呈波动变化,无规卷曲含量相对较高, $\beta$ -转角含量相对较低,二者与氯化钠浓度相关性系数分别为 $-0.7856$ 和 $0.4452$ 。表明添加氯化钠可在一定范围内调节蛋白二级结构的含量,可能是氯化钠改变了蛋白质氨基酸的亲/疏水性基团结构,从而改变了蛋白质二级结构的含量。

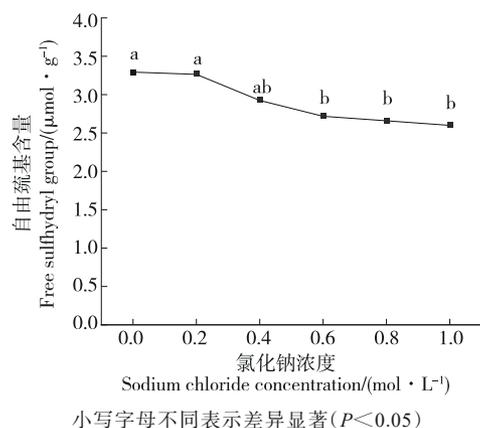


图7 氯化钠对猪血浆蛋白自由巯基的影响

Figure 7 Effects of NaCl concentration on free sulfhydryl group of PPP

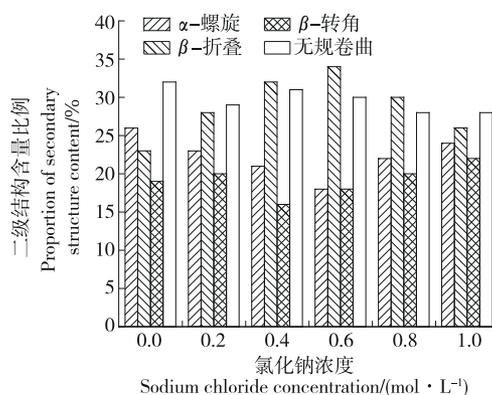


图8 氯化钠对猪血浆蛋白二级结构的影响

Figure 8 Effects of NaCl concentration on secondary structures of PPP

### 3 结论

猪血浆蛋白溶解度在氯化钠浓度为 $0.2 \text{ mol/L}$ 时达到最大值,随后呈下降趋势,其表面疏水性及乳化性随氯化

钠浓度上升而增强,但起泡性、持水性呈下降趋势,而持油性和浊度增加;经氯化钠处理后的猪血浆蛋白紫外吸收光谱出现蓝移,平均粒径增大,而 Zeta 电位绝对值和自由巯基含量减少,表明氯化钠可使猪血浆蛋白质分子间的相互作用增强,从而改变了蛋白质的结构特性,包括蛋白二级结构含量,进而达到调控其功能特性的目的。后续可利用分子生物学、结构生物学等技术,解析氯化钠与猪血浆蛋白相互作用的分子机制,以更全面地了解氯化钠对猪血浆蛋白的影响。

### 参考文献

- [1] 孙子怡, 杨剑婷, 谢宁宁, 等. 猪血球蛋白营养分析与水解工艺优化及制备金属螯合肽的研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 177-182.  
SUN Z Y, YANG J T, XIE N N, et al. Study on nutritional analysis and hydrolysis process optimization of porcine haemoglobin and preparation of metal-chelating peptides[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 177-182.
- [2] 龚慧芳, 张淇美, 唐青海, 等. 低温乙醇法在猪血浆白蛋白提取中的适用性研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(5): 172-174.  
GONG H F, ZHANG Q M, TANG Q H, et al. Research on the applicability of low temperature ethanol method in the extraction of porcine plasma albumin[J]. Anhui Agricultural Science, 2021, 49(5): 172-174.
- [3] 武美杉, 何晓叶, 李璇, 等. 动植物蛋白结构表征与功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 442-449.  
WU M S, HE X Y, LI H, et al. Advances in structural characterisation and functional properties of animal-plant mixed proteins[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(21): 442-449.
- [4] 卢滇楠, 刘铮. 蛋白质在溶液中构象转换的分子动力学模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2005, 23(6): 661-668.  
LU D N, LIU Z. Molecular dynamics simulation of protein conformational transitions in solution[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2005, 23(6): 661-668.
- [5] SMITH W R, NEZBEDA I, KOLAFI J, et al. Recent progress in the molecular simulation of thermodynamic properties of aqueous electrolyte solutions[J]. Fluid Phase Equilibria, 2018, 466: 19-30.
- [6] 佟平, 臧凤, 侯裕梁, 等. 钠盐替代物对全蛋液功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 52-59.  
TONG P, ZANG F, HOU Y L, et al. Effect of sodium salt substitute on the functional properties of liquid whole egg[J]. Food Science, 2022, 43(24): 52-59.
- [7] VUONG H, TRAN N, TRAN T, et al. Effects of pH and salt concentration on functional properties of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) seed albumin concentrate[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2016, 51(5): 1 212-1 219.
- [8] ZHANG S, SUN Y, XIE Q, et al. Effect of different salts on the foaming properties of model protein systems for infant formula [J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(5): 2 668-2 680.
- [9] 张佳敏, 王卫, 白婷, 等. 猪血凝胶条件的响应面法优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(17): 237-241.  
ZHANG J M, WANG W, BAI T, et al. Optimisation of pig blood gel processing with response surface method[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(17): 237-241.
- [10] 孔保华, 张立娟, 刁新平. 影响猪血浆蛋白热诱导凝胶特性及持水性因素的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 75-80.  
KONG B H, ZHANG L J, DIAO X P. Factors affecting textural properties and water-holding capacity of heat-induced gels of porcine blood plasma protein[J]. Food Science, 2010, 31(7): 75-80.
- [11] 曹传爱, 李月, 商旭, 等. 氯化钠浓度对含猪血浆蛋白水解物的乳状液稳定性的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(7): 1-7.  
CAO C A, LI Y, SHANG X, et al. Effect of sodium chloride on the stability of emulsion contained porcine plasma protein hydrolysates[J]. Food Research and Development, 2018, 39(7): 1-7.
- [12] 周晓配, 贾峰, 冯景丽, 等. 紫外分光光度法研究谷氨酰胺转氨酶交联醇溶蛋白的特性[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 45-49.  
ZHOU X P, JIA F, FENG J L, et al. Study on properties of transglutaminase-crosslinked gliadin by UV spectrophotometry [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(1): 45-49.
- [13] MEENMANEE S, RATTANANUKROM A, THAIIPHANIT S, et al. Improvement of solubility, foaming, and emulsification properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) protein by non-enzymatic deamidation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153: 112493.
- [14] 杨川, 武广玉, 李应彪, 等. 低压静电场结合高湿解冻对羊肉保水性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 86-94.  
YANG C, WU G Y, LI Y B, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with high humidity thawing on water holding capacity of frozen lamb meat[J]. Food Science, 2023, 44(11): 86-94.
- [15] 江连洲, 王一畅, 马依彤, 等. 微波对大豆蛋白氧化聚集体结构及功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 261-269.  
JIANG L Z, WANG Y C, MA Y T, et al. Effects of microwave treatment on the structural and functional properties of oxidized aggregated soybean proteins[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2023, 39(9): 261-269.
- [16] HE W, ZHAO W, YANG R. Effects of wheat gluten modified by deamidation-heating with three different acids on the microstructure of model oil-in-water emulsion and rheological-physical property of ice cream[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 679-690.
- [17] 曾琪, 胡淼, 王欢, 等. pH 值处理对黑豆分离蛋白结构、流变

- 特性及乳化性能的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 15-21.  
ZENG Q, HU M, WANG H, et al. Effect of pH treatment on structure, rheological properties and emulsifying properties of black bean protein isolate[J]. Food Science, 2020, 41(22): 15-21.
- [18] 张聪聪. 水溶性猪肝蛋白功能特性及其在肉制品中的应用[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 19-20.  
ZHANG C C. Functional properties and application in meat products of pork liver water-soluble protein[D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 19-20.
- [19] DENG Y, HUANG L, ZHANG C, et al. Physicochemical and functional properties of Chinese quince seed protein isolate[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 539-548.
- [20] 张艳艳, 王冰蕊, 张少可, 等. 超声波对花生粕蛋白功能特性及结构特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(8): 48-53.  
ZHANG Y Y, WANG B R, ZHANG S K, et al. Effect of ultrasonic on the functional and structural characteristics of peanut meal protein[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2019, 34(8): 48-53.
- [21] 王冰, 杨杨, 范洪臣, 等. 热处理温度和离子强度对汉麻蛋白热聚集行为的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(16): 5 337-5 344.  
WANG B, YANG Y, FAN H C, et al. Effects of heat treatment temperature and ionic strength on the thermal aggregation behavior of hemp protein[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2022, 13(16): 5 337-5 344.
- [22] JIA F, YE K, ZHANG C, et al. Effects of vitamin C on the structural and functional characteristics of wheat gluten[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(2): 79-86.
- [23] KIM K S. Changes of glycinin conformation due to pH, heat and salt determined by differential scanning calorimetry and circular dichroism[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2004, 39(4): 385-393.
- [24] 任娟蕊, 傅婧, 赵友爱. 亚麻籽分离蛋白结构表征及其性能分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 326-336.  
REN J R, FU J, ZHAO X A. Structural characterization and performance analysis of flaxseed isolate protein [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 326-336.
- [25] 胡远辉, 吕春霞, 廖慧琦, 等. NaCl处理对养殖大黄鱼肌原纤维蛋白风味吸附及结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 202-209.  
HU Y H, LU C X, LIAO H Q, et al. Effect of sodium chlorid treatment on flavor adsorption and structure of cultured large yellow croaker myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(14): 202-209.
- [26] 贾宝环, 于洋, 王悦, 等. 盐效应对还原变性溶菌酶聚集的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 588-595.  
JIA B H, YU Y, WANG Y, et al. Salt effects on the aggregation of reduced-denatured lysozyme[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2018, 38(6): 588-595.
- [27] 刘磊, 郑亚军, 李艳, 等. 椰子分离蛋白起泡性、黏度及其影响因素的研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(12): 2 358-2 362.  
LIU L, ZHENG Y J, LI Y, et al. Viscosity and foaming ability of coconut protein isolates and the influencing factors[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(12): 2 358-2 362.
- [28] 陈玉峰, 巫丽君, 严红云, 等. 食品体系中泡沫的稳定性及其影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 386-395.  
CHEN Y F, WU L J, YAN H Y, et al. Progress in research on foam stability and the factors influencing it in the food system [J]. Food Science, 2022, 43(21): 386-395.
- [29] GROSSMANN L, HINRICHS J, WEISS J. Solubility of extracted proteins from *Chlorella sorokiniana*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Nannochloropsis oceanica*: impact of pH-value[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 105: 408-416.
- [30] 顾楠, 张子沛, 吴锦波, 等. 不同处理方式对鹰嘴豆分离蛋白乳化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(12): 158-161.  
GU N, ZHANG Z P, WU J B, et al. Effects of different treatments on emulsifying properties of chickpea protein isolates[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(12): 158-161.
- [31] RESENDIZ-VAZQUEZ J A, ULLOA J A, URIAS-SILVAS J E, et al. Effect of high-intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 436-444.
- [32] 张雪春, 李如蕊, 程群, 等. 羟自由基氧化对核桃蛋白性质和结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 107-112.  
ZHANG X C, LI R R, CHENG Q, et al. Effect of hydroxyl radical oxidation on properties and structure of walnut protein [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 107-112.
- [33] 窦丹彤. 梅花鹿皮胶原蛋白肽制备及其活性研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021: 16.  
DOU D T. Study on preparation and activity of collagen peptide from skin of *Cervus nippon*[D]. Shenyang: Liaoning University, 2021: 16.
- [34] HE L, GAO Y, WANG X, et al. Ultrasonication promotes extraction of antioxidant peptides from ovide gelatin by modifying collagen molecule structure[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 78: 105738.
- [35] 王启明, 唐瑜婉, 李春翼, 等. NaCl浓度对麦醇溶蛋白与槲皮素相互作用的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 29-39.  
WANG Q M, TANG Y W, LI C Y, et al. Spectroscopic analysis of interaction between gliadin and quercetin under different NaCl concentrations[J]. Food Science, 2021, 42(8): 29-39.
- [36] 袁江兰, 黄亚明, 李传雯, 等. 大米谷蛋白热聚集的盐效应及机制[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 69-73.  
YUAN J L, HUANG Y M, LI C W, et al. Salt effect and mechanisms of thermal aggregation of rice glutelin[J]. Food Industry Science and Technology, 2017, 38(18): 69-73.