添加不同水平 NaCl 对蛋黄浆质凝胶性的影响研究

杨海燕，金永国，孙秀秀，靳国锋，马美湖

（华中农业大学食品科技学院，湖北武汉 430070）

摘要：为了探究腌制过程中 NaCl 对蛋黄浆质凝胶品质的影响，本实验主要研究了不同 NaCl 腌制浓度（处理浓度 0%、0.5%、1%、1.5%、2%）下蛋黄浆质凝胶的保水性、浆质凝胶质构特性、浆质色度、粒径分布、流变特性、蛋白成分、显微结构。研究结果表明，在 2%浓度 NaCl 的作用下，蛋黄浆质凝胶保水性最好，保水性显著增加（$p<0.05$）；而在 2% NaCl 添加量时，浆质凝胶质构特性中硬度、咀嚼性显著下降（$p<0.05$），弹性基本不变；流变学研究发现，NaCl 作用下浆质凝胶交联程度下降，形成凝胶性能下降；蛋黄浆质在 NaCl 的作用下，完整的乳状液体系破坏，部分蛋白产生聚集，浆质粒径变大；浆质中脂质、蛋白呈现不规则分布，NaCl 的作用对浆质蛋白肽链结构并不造成影响；结果说明，NaCl 作用降低了蛋黄浆质形成凝胶品质。该研究结果可为腌制过程中蛋黄浆质变化提供理论依据。

关键词：蛋黄；浆质；凝胶；蛋白

文章篇号：1673-9078(2018)08-165-171 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.8.024

Effects of Different NaCl Addition Levels on the Gel Properties of Egg Yolk Plasma

YANG Hai-yan, JIN Yong-guo, SUN Xiu-xiu, JIN Guo-feng, MA Mei-hu

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to explore the effect of salt on the quality of egg yolk plasma in the process of pickling, changes in texture and index of water in egg yolk plasma gel, colour, particle size distribution, rheology, protein composition and microstructure under different concentration of NaCl (treatment concentration 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%) were determined in this paper. Results showed that the egg yolk plasma gel under 2% NaCl treatment, the water holding capacity significant increase better($p<0.05$). Under the 2% concentration treatment of NaCl, the gel hardness and chewiness of egg yolk plasma gel significantly decreased ($p<0.05$), while the springiness basically unchanged, rheology studies showed that under the treatment of NaCl, the cross linking degree of egg yolk plasma gel decreased, and the properties of it also decreased. with the effect of NaCl, the emulsion system were destroyed, result in the sizes of protein particles were large. In the plasma, proteins and lipids are distributed discontinuously with irregularly structured. However, NaCl treatment did not affect the structure of the protein peptide chain of plasma. The results showed that NaCl reduced the quality of yolk plasma gel. This study provided a theoretical basis for the changes of egg yolk plasma during salted egg.

Key words: egg yolk; plasma; gel; protein

咸蛋是我国乃至东南亚地区的一种传统腌制蛋制品，因其独特的口感和风味受到广大消费者的喜爱，是人们日常饮食中的一种重要食品。在咸蛋中蛋黄是消费者最喜爱食用的部分，也是咸蛋品质好坏的重要评价部位。一般好的咸蛋要求蛋黄“鲜、细、嫩、松、沙、油”。目前，由于市场的广泛需求，蛋黄会被直接腌制成咸蛋黄，大量用于蛋黄包、粽子、月饼等中式食品中[1,2]。

蛋黄是一种 O/W 的乳状液，溶解相为浆质，其余的则为悬浮的颗粒，适度离心得到浆质和颗粒成分[3,4]；浆质占蛋黄干物质的 77%~81%，其中包括 85%的低密度脂蛋白和 15%的卵黄球蛋白[5]；而在咸蛋及咸蛋黄腌制过程中，在 NaCl 的作用下，蛋黄内原本分布均匀的乳化型细小脂肪珠分离析出，水分向外扩散，亲油基团相互聚合，蛋黄中稳定的乳状液体系被破坏，最终形成的咸蛋黄丰润鲜红、油露松沙、营养丰富[6,7]。目前多数研究集中于腌制方法和工艺研究，而对于腌制过程中单就蛋黄浆质及其凝胶特性的研究

收稿日期：2018-04-13

基金项目：国家蛋鸡产业体系项目（2013084）；现代农业产业技术体系项目（CARS-40-K24）

作者简介：杨海燕（1994-），女，硕士，研究方向：食品工程

通讯作者：靳国锋（1983-），男，博士，副教授，研究方向：畜产品加工及质量控制

较少[8,9]；例如，关于蛋黄浆质 Anton 等[3]人的研究中发现蛋黄浆质乳化性高于颗粒；Sirvente 等[11]人研究发现高压显著影响浆质乳化性，但并不改变浆质流变特性[10]；孙嘉文等研究了冷冻对蛋黄全蛋液、蛋黄颗粒和蛋黄浆质三部分乳化性质的影响，发现蛋黄进行冷冻时，蛋黄颗粒和蛋黄浆质之间可能发生了相互作用，产生分子间和分子内的聚集行为，导致蛋黄经过冷冻后乳化容量以及可溶性蛋白等显著降低；Laca 等[12]对蛋黄浆质及颗粒性质的研究中发现，蛋黄颗粒比浆质抵抗热变性的能力强，这是因为浆质中的低密度脂蛋白对热敏感；浆质中的蛋白在蛋黄凝胶中起着重要作用，其凝胶性是禽蛋蛋白较重要的功能特性，研究蛋黄浆质在腌制过程中的凝胶性具有重要意义。本实验旨在研究不同 NaCl 浓度下蛋黄浆质凝胶性的影响，观察不同浓度 NaCl 腌制蛋黄 24 h 后，蛋黄凝胶保水性、凝胶质构；浆质流变性、粒径分布等，以探讨腌制蛋黄浆质凝胶变化情况，为咸蛋腌制过程中浆质凝胶变化提供理论基础，并为未来蛋品开发提供可能。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鸡蛋（海兰褐壳蛋），购自华中农业大学农贸市场。

NaCl、正己烷均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

Sigma 3-30N 型高速冷冻离心机，美国 Sigma 公司；JSM-6390 型扫描电子显微镜，日本 NTC；TA.XT.plus 型质构仪，英国 stable micro system；ULtrascan VIS 台式分光测色仪，美国 Hunter Lab 公司；DHR2 型流变仪，美国沃特斯公司；APA2000 型激光粒度分布仪，英国马尔文仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 实验设计

新鲜鸡蛋去壳分离蛋清、蛋黄，获得去除蛋黄膜的蛋黄液。采用直接腌制的方法加入 NaCl，其中 NaCl（NaCl 占蛋黄液质量百分比）添加量分别为 0%（设为对照组）、0.5%、1.0%、1.5%、2%（咸蛋腌制成熟后，蛋黄含盐量一般为 1.5%左右，设为腌制组），在 4 ℃条件下腌制 24 h；腌制完成后加入 1.5 倍的蒸馏水，搅拌均匀调节 pH=7 于 4 ℃放置过夜，10000 r/min 离心 40 min 获得蛋黄浆质，置于 4 ℃下保存，备用[13]。

1.3.2 浆质凝胶的制备

取 15 mL 浆质于 20 mL 塑料杯中，用保鲜膜封口，用橡皮筋扎紧后 90 ℃水浴加热 40 min，然后取出用自来水冷却 20 min，放于 4 ℃条件下冷藏过夜。

1.3.3 浆质凝胶保水性的测定

凝胶保水性的测定[12]：将制备好的凝胶置于高速冷冻离心机中，10000 r/min 离心 10 min 后，称总重，去除离心出的水分，再次称重，按照以下公式计算凝胶保水性（water holding capacity，WHC）：

$$WHC/\% = \frac{(W_1 - W)}{(W_2 - W)} \times 100\%$$

其中 W_1 为离心管和离心除水后的凝胶重，W_2 为离心前离心管和凝胶重，W 为离心管重。每个处理有 3 个平行。

1.3.4 浆质凝胶质构测定

用质构仪测量蛋黄浆质凝胶质构特性[14]。将样品切成 1 cm×1 cm×1 cm 的正方体，并将其中心置于质构仪探头的正下方样品台上，采用 P/36R 探头对样品进行两次压缩。测定条件如下：测前速度 2.0 mm/s；测试速度 1.0 mm/s；测后速度 2.0 mm/s；压缩百分比 50%，触发力 1.0 g，触发类型 auto 数据摄取速率 200 pps 停留时间 5 s。测试完成后，用仪器自带软件内部宏对测试结果进行处理，为了保证测定结果的准确性，质构测定重复 10 次。得到凝胶硬度（Hardness）、弹性（Springiness）、凝聚性（Cohesiveness）、咀嚼性（Chewiness）等。

1.3.5 浆质成分粒径分布测定

采用 MS2000 型激光粒度分析仪测定蛋黄浆质中粒度的分布情况。光学参数：相对折射率 1.44，粒子吸收 0，连续相折射率为 1.33。

1.3.6 浆质成分色度测定

采用 Ultra Scan VIS 型色度仪测定蛋黄浆质的明度（L*）、红绿值（a*）、黄蓝值（b*）。L*值 0~100 表示全黑至全白，a*值由小至大表示绿色至红色，b*由小至大表示表示蓝色至黄色。

1.3.7 浆质蛋白 SDS-PAGE 电泳测定

将样品 1:1 加入正己烷磁力搅拌 30 min，于 4 ℃环境中静置 4 h 后离心除去有机试剂，除去浆质中脂质成分；配置蛋白浓度为 2 mg/mL 的溶液，取 40 μL 样品，加 10 μL 蛋白上样缓冲液，混合均匀后沸水浴煮沸 5 min，取 20 μL 上样。采用浓缩胶 5%，分离胶 12%进行电泳分析。

1.3.8 浆质成分流变特性测定

采用马尔文旋转流变仪，在 25 ℃下，选择 0°/40 mm 平板系统，1 mm 平板间距，固定振荡应力为 10%，

测定浆质的弹性模量(G')、黏性模量(G")随振荡频率的变化，振荡频率的变化范围为 0.1~40 Hz。

1.3.9 扫描电子显微镜观察浆质凝胶结构

浆质凝胶切成 1 cm×1 cm×1 cm 体积大小块状，50 ℃烘干 30 min 脱去水分，于中心取样装裱于扫描电镜板上，喷金处理后用扫描电子显微镜观察。

1.3.10 数据分析

所有数据采用 WPS office 2016 进行统计处理，采用 IBM SPSS Statistics 22 对数据进行方差分析，用 Origin Pro 8.5 软件作图，以 $p<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 NaCl 处理对蛋黄浆质凝胶保水性的影响

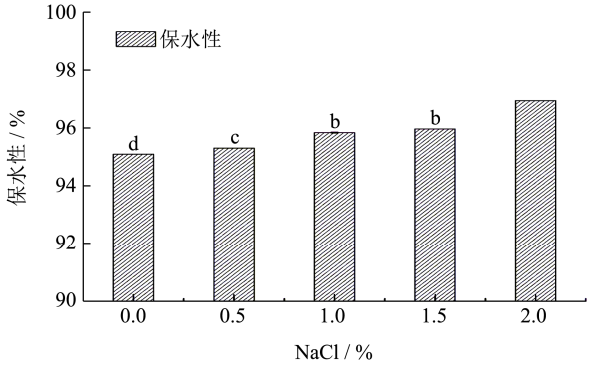

图 1 不同 NaCl 浓度下蛋黄浆质凝胶保水性影响

Fig.1 Effect of different concentration of NaCl treatment on water holding capacity of egg yolk plasma gel

注：不同小写字母表示差异显著性（$p<0.05$）。

由图 1 可知，蛋黄浆质凝胶在 NaCl 添加量为 2%时，蛋黄浆质凝胶保水性最好，且与其他处理组凝胶保水性差异显著（$p<0.05$），蛋黄浆质凝胶保水性随 NaCl 浓度的增加而增大。

LI J 等[15]研究发现蛋黄凝胶在加入 1.8% NaCl 后，凝胶保水性从 98.70%逐渐增加到 99.16%，和本文研究结论一致。这可能是因为 NaCl 的加入增加了凝胶内部水的流动性与分布，并使蛋白分子易于形成水离子键，改变凝胶内部疏水相互作用。凝胶的保水性反映了蛋黄浆质对水的保持能力，保水性越高，更好防止水分子的逸出[16]。

2.2 NaCl 处理对蛋黄浆质凝胶质构特性影响

由表 1 可知，用 0.5%、1%、1.5%、2%浓度的 NaCl 腌制 24 h 后，蛋黄浆质凝胶的硬度值均低于对照组，特别是 2%浓度的 NaCl 处理后，蛋黄浆质凝胶硬度比 0%对照组显著降低了 10.719 N（$p<0.05$）；浆质凝胶内聚性随 NaCl 浓度增加，呈现下降趋势，0.5%、1%及 1.5%NaCl 组间变化无差异，而 2%浓度 NaCl 处理组差异显著（$p<0.05$）；蛋黄浆质凝胶弹性随 NaCl 添加量的增大基本不变；腌制组样品的咀嚼性和胶黏性均低于 0% NaCl 组，但是随着 NaCl 添加量的增加，未呈现直线下降趋势；综上，2%NaCl 添加量时，浆质凝胶质构特性最差，凝胶品质降低。

蛋黄浆质中，低密度脂蛋白含量高达 85%，是蛋黄凝胶过程中起主要作用的蛋白质，其他蛋白质并不直接参与蛋黄凝胶作用[17]；在 WAKMATU 等[18]人的研究中发现，当添加 1%~2%NaCl 时，形成低密度脂蛋白-水-NaCl 复合物，会抑制低密度脂蛋白形成的凝胶，凝胶硬度、内聚性等下降；同时在 KITABATAKE 等[19]人的研究中发现当 NaCl 浓度较高时，NaCl 使凝胶中出现不溶性凝集物，凝胶强度下降。因此，当添加不同浓度的 NaCl 时，维持低密度脂蛋白稳定性的疏水相互作用被破坏，形成低密度脂蛋白-水-NaCl 复合物，形成凝胶质构特性下降。

表 1 不同 NaCl 浓度下蛋黄浆质凝胶质构

Table 1 Textural profiles of the egg yolk plasma gel with different concentration of NaCl treatment

质构指标	NaCl 浓度/%				
	0	0.5	1	1.5	2
硬度	80.40±5.24^{a}	76.39±5.70^{ab}	72.04±6.43^{b}	71.86±5.16^{b}	69.68±5.42^{b}
粘附性	-3.27±0.06^{bc}	-3.09±0.30^{ab}	-2.83±0.21^{a}	-2.83±0.13^{a}	-3.42±0.31^{c}
弹性	0.96±0.01^{a}	0.96±0.01^{a}	0.96±0.01^{a}	0.96±0.01^{a}	0.96±0.01^{a}
内聚性	0.75±0.01^{a}	0.72±0.01^{b}	0.72±0.01^{b}	0.72±0.01^{b}	0.70±0.01^{c}
胶黏性	60.22±4.45^{a}	54.97±4.82^{ab}	51.67±5.36^{ab}	51.85±4.17^{bc}	49.090±4.09^{c}
咀嚼性	58.06±4.05^{a}	53.08±4.68^{a}	50.03±5.18^{ab}	50.18±3.95^{ab}	47.33±4.09^{b}

注：不同小写字母表示差异显著性（$p<0.05$）。

2.3 NaCl 处理对蛋黄浆质粒径分布的影响

由图 2 可知，0%、0.5%、1%、1.5%、2% NaCl 添加量下蛋黄浆质粒径分布情况。在 NaCl 的添加量为 0%时，粒径呈现单峰分布，浆质粒径分布在 1~100 μm 之间，分布较好；这和 PILLET E 等人测定的蛋黄

浆质粒径分布图一致，均呈现较好单峰分布[17]；当加入 NaCl 后，逐渐出现两个较小的峰，一个分布在 1~10 μm，一个分布在 100~1000 μm，粒径分布图峰向右移动，部分浆质蛋白发生聚集，粒径变大；同时由于 Na^+ 的加入增加了蛋白的溶解性，部分蛋白粒径变小，形成 1~10 μm 的小峰。

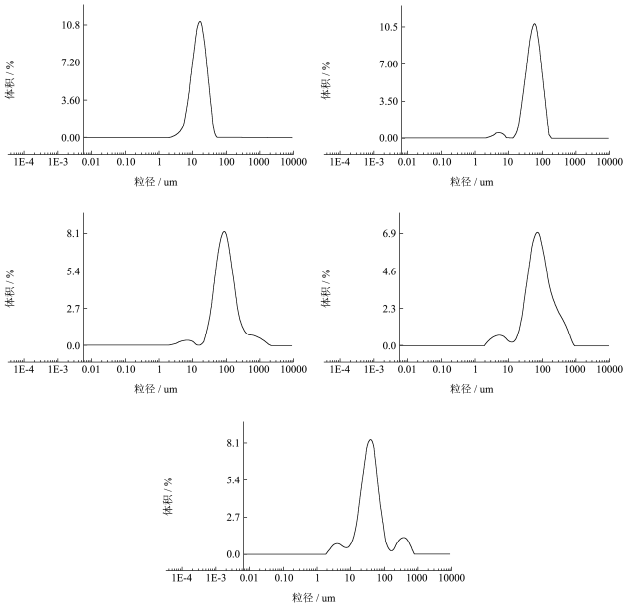

图 2 不同浓度 NaCl 处理蛋黄浆质粒径分布图

Fig.2 Particle size distribution of egg yolk plasma with different concentration of NaCl treatment

粒径的分布反应了蛋黄浆质的稳定性，Na^+的作用使蛋黄的稳定性破坏，当 NaCl 浓度过高时，连接蛋黄颗粒高密度脂蛋白和卵黄磷蛋白的钙磷桥被 Na^+ 破坏，颗粒蛋白溶解度可达到 80%以上，蛋黄稀释静置后浆质与颗粒形成较为明显的分层，产生如图 4 所示现象，在 MCBEE L E 等人最为经典的蛋黄浆质与颗粒分离法中，选用 0.17 M 的 NaCl 作为稀释剂[20]，可见一定浓度的 NaCl 会影响浆质溶液的稳定性。

2.4 NaCl 处理对蛋黄浆质色度影响

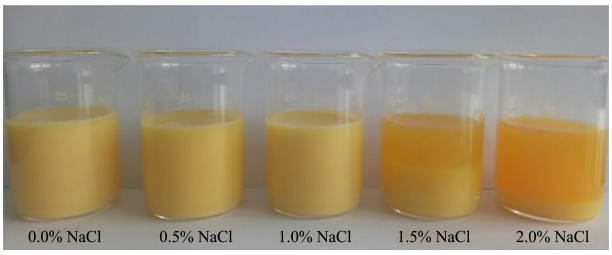

图 3 不同 NaCl 浓度下蛋黄稀释静置图

Fig.3 Diluting statics of egg yolk solution with different concentration of NaCl treatment

从表 2 可以看出，随着 NaCl 浓度的增加，蛋黄浆质明度 L*增加，浆质颜色逐渐偏向红黄色，其色泽整体变深。蛋黄的颜色是由于脂溶性类胡萝卜素（叶黄素，包括玉米黄素、*β*-隐黄素以及少量的 *β*-胡萝卜素）的存在，其中脂类集中在蛋黄浆质中[21]，腌制会使蛋黄中脂质浸出，脂溶性类胡萝卜素溶解量加大，浆质颜色由淡黄色变黄色、橙黄色，图 3 中可以明显看出蛋黄浆质色度变化。

蒋劲松对咸蛋黄分离腌制过程中，也发现蛋黄明度随腌制时间延长、腌制液浓度增加，明度增加，是因为游离脂肪酸的析出[22]；吴玲部分替代 NaCl 腌制对蛋黄色度的变化中，蛋黄颜色由鲜鸭蛋的亮黄色变红黄后逐渐变暗变深，当咸蛋腌制成熟时，L*值变化较为缓慢[23]，咸蛋腌制完成；腌制过程中，NaCl 的脱水作用也会使蛋黄色素变浓，颜色变深。不同 NaCl 浓度下蛋黄浆质色度变化，反映了蛋黄在腌制过程中盐浓度越高，游离脂肪酸析出越多，脂溶性类胡萝卜素溶解增加，使得蛋黄浆质明度增加，颜色偏向红黄色。浆质色度的变化体现着浆质中脂质变化、咸蛋腌制状态，而脂质在蛋黄浆质凝胶网络的形成中起到了填充作用，部分促进了凝胶品质形成。

表 2 不同 NaCl 浓度下蛋黄浆质色度变化

Table 2 Values of L*, a* and b* colour coordinates for the eggs yolk plasma with different concentration of NaCl treatment

色度指标	NaCl 浓度/%				
	0	0.5	1	1.5	2
L*	21.41±0.35^e	24.52±0.30^d	30.54±1.10^c	37.46±2.16^b	45.31±1.79^a
a*	5.51±0.79^c	3.22±1.17^d	11.58±1.55^b	12.15±1.98^b	16.01±1.61^a
b*	12.50±1.07^c	8.31±2.55^d	20.47±2.29^b	21.72±1.32^b	38.90±2.52^a

2.5 NaCl 处理对蛋黄浆质蛋白影响

通过 SDS-PAGE 凝胶电泳分析 NaCl 对蛋黄浆质蛋白条带的影响。通过以标准蛋白的相对迁移做为对照，可以看出蛋黄浆质中主要为低密度脂蛋白和卵黄蛋白，分子量 175 ku、140 ku、70 ku、15 ku 为低密度脂蛋白的脱辅基蛋白质[24]，卵黄蛋白有三个异构体，分别为 *α*、*β*、*γ*，分子量为 85 ku、42 ku、65 ku，这和 AMANDA 关于蛋黄浆质的 SDS-PAGE 图一致[21]。蛋白样品经过 NaCl 处理后，蛋白质条带没有明显变

化，说明实验过程中 NaCl 对蛋黄浆质的一级结构并不造成影响。郑华等的研究也表明，腌制过程中尽管食盐对蛋黄蛋白质的空间结构造成了一定程度的改变，但并未对蛋白质的肽链结构发生作用[6]；则 NaCl 处理，并未对蛋黄浆质凝胶蛋白质肽链结构造成影响。

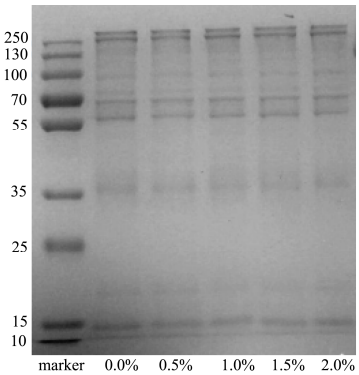

图 4 不同 NaCl 浓度下蛋黄浆质 SDS-PAGE 图

Fig.4 SDS-PAGE patterns of egg yolk plasma with different concentration of NaCl treatment

2.6 NaCl 处理对蛋黄浆质流变特性影响

图 5 为不同腌制浓度下蛋黄浆质的 G’和 G”的扫描频率图，对于某一确定粘弹性体系，G’与体系中交联、缠结或聚集的弹性组分成比例；G”与体系中粘性成分有关；G’和 G”可作为评价粘弹性流体弹性以及粘性的大小。

图 5 中蛋黄浆质所有样品的 G’和 G”均随着扫描频率的增加而增加，且 G’大于 G”，可知蛋黄浆质是弹性流体，这和 WANG YL 等[26]人研究结果一致；图 5 中蛋黄腌制时间 24 h 后，腌制蛋黄浆质储能模量较新鲜蛋黄浆质均下降，NaCl 浓度升高，腌制蛋黄浆质储能模量升高，体系中交联、聚集的弹性成分增加；损失模量在 NaCl 的作用下变化较小，蛋黄浆质粘性降低较少。

在蛋黄浆质中含有较多的低密度脂蛋白，低密度脂蛋白悬浮在蛋黄溶液中，其具有形成凝胶的能力，当经过一段时间的腌制后，咸蛋黄转变为弹性凝胶[27]。KAEWMANEE 等[28]人的研究中也发现，当 NaCl 添加量为 1.5%时，蛋黄由溶胶转变为凝胶，蛋黄中浆质流变学行为发生变化。AMANDA[21]对新鲜蛋黄浆质中成分（lipidic paste）及颗粒进行了频率扫描，发现其 G’及 G”同样随着扫描频率的增加而增加，且 tanδ 小于 1，呈现类固体的性质；因此，当 NaCl 腌制 24 h 处理后，蛋黄浆质凝胶 G’和 G”均低于未处理组，形成凝胶交联程度降低，凝胶性能下降；而当 NaCl 浓度增加至一定值时，形成凝胶交联聚集弹性成分增加，凝胶性能相对增强。

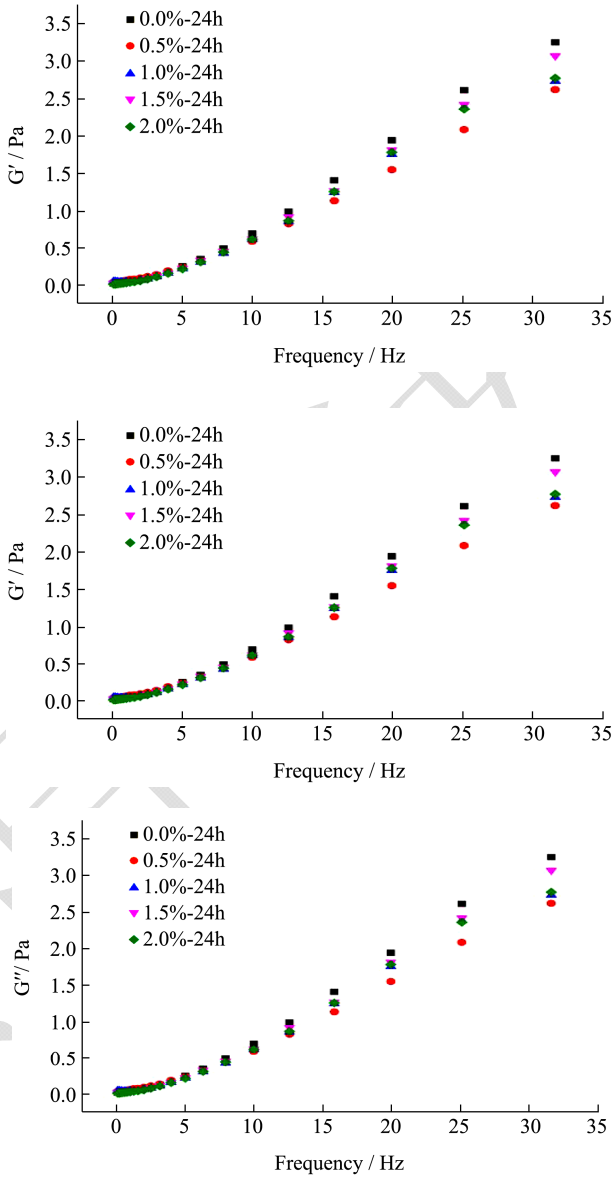

图 5 不同 NaCl 浓度蛋黄浆质储能模量（G'）与损失模量（G''）变化

Fig.5 The changes of storage modulus (G’) and loss modulus (G”) of egg yolk plasma with different concentration of NaCl treatment

2.7 NaCl 处理对蛋黄浆质凝胶微观结构影响

不同浓度 NaCl 处理，蛋黄浆质凝胶扫描电镜图（Scanning electron microscopy，SEM）如图 6 所示，从图中可以看出蛋黄浆质凝胶中不规则蛋白分布；NaCl 添加量为 0%时，凝胶中蛋白呈现较小的粒径，当 NaCl 添加量增加时，蛋黄浆质凝胶中部分蛋白颗粒粒径变大，这和浆质粒径测量是一致的（图 2）；当 NaCl 添加到蛋黄中，蛋黄中的脂质成分游离出来，覆盖到蛋白表面，将蛋白中的孔洞填补，使得浆质凝胶表面更为紧缩、纹理粗糙，同时 NaCl 的脱水作用使

得这一现象更为明显；AMANDA 等[21]人的对新鲜蛋黄浆质组分的 SEM 图中，脂质和蛋白在浆质组分中也呈现不规则的块状分布。

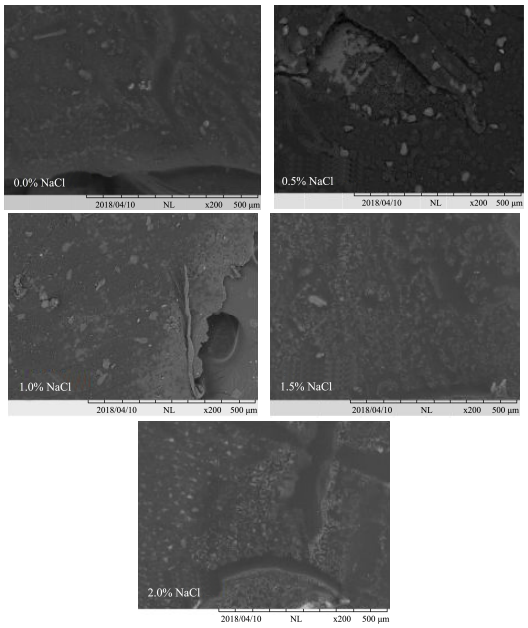

图 6 不同浓度 NaCl 处理蛋黄浆质扫描电镜图

Fig.6 Scanning electron microscopy of egg yolk plasma with different concentration of NaCl treatment

3 结论

本实验通过对蛋黄分离腌制，运用多种分析检测手段，分析 NaCl 处理后蛋黄浆质色度、粒径分布、流变性以及浆质蛋白分布，蛋黄浆质凝胶的保水性、凝胶质地结构特性以及凝胶微观结构，来研究 NaCl 处理对蛋黄浆质凝胶的影响。主要研究结果如下：随着 NaCl 添加量由 0%增加至 2%，蛋黄浆质保水性随 NaCl 浓度的增加而显著增大（$p<0.05$）；浆质凝胶硬度、咀嚼性、内聚性均在 NaCl 的作用下，凝胶系数下降，而弹性基本不变；流变学研究表明，蛋黄浆质是弹性流体，一定量 NaCl 腌制后，蛋黄浆质凝胶性能下降；NaCl 的作用会影响蛋黄浆质粒径分布，使部分蛋白分子产生聚集，粒径变大；而对蛋白质肽链结构并不造成影响；NaCl 处理后蛋黄浆质中蛋白、脂质随着盐的不断渗入，蛋黄脱水，脂质不断分解，凝胶结构发生改变，蛋白粒径变大，结构粗糙，而游离出来的脂质会使凝胶中蛋白颗粒包裹起来形成皱缩状态。因此，0.5%、1%、1.5%、2%浓度 NaCl 腌制蛋黄，不仅降低了蛋黄浆质形成凝胶质构特性，而且形成凝胶特性下降。

参考文献

[1] 潘康,冯枭,李蓉,等.盐水法和包灰法腌制咸蛋理化性质的比较[J].食品与生物技术学报,2011, 30(4):542-548
PAN Kang, FENG Xiao, LI Rong, et al. Study on chemical and physical properties of duck egg of saline salting and plant ash salting [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2011, 30(4): 542-548

[2] 彭辉,林捷,肖丹华,等.咸蛋黄成熟机制及品质影响因素研究进展[J].食品研究与开发,201132(3):181-184
PENG Hui, LIN Jie, XIAO Dan-hua, et al. Research development of mechanism of changes in salted egg yolk during pickling process [J]. Food Research and Development, 2011, 32(3): 181-184

[3] Anton M, Martinet V, Dalgalarrondo M, et al. Chemical and structural characterisation of low-density lipoproteins purified from hen egg yolk [J]. Food Chemistry, 2003, 83(2): 175-183

[4] Strixner T, Kulozik U. Continuous Centrifugal fractionation of egg yolk granules and plasma constituents influenced by process conditions and product characteristics [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 89-98

[5] Burley R W, Cook W H. Isolation and composition of avian egg yolk granules and their constituents [J]. Canadian Journal of Biochemistry & Physiology, 1961, 39(8): 1295-1307

[6] 郑华,彭辉,林捷,等.食盐对咸蛋黄蛋白质特性的影响[J].食品科学,2013,34(1):83-87
ZHENG Hua, PENG Hui, LIN Jie, et al. Effect of salt on properties of salted yolk protein [J]. Food Chemistry, 2013, 34(1): 83-87

[7] 饶红花.低钠咸蛋的加工工艺及保鲜研究[D].南昌:江西农业大学,2014
RAO Hong-hua. Study on the processing and preservation of low sodium salted egg [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014

[8] 苏鹤,杨瑞金,赵伟,等.低盐咸蛋的腌制工艺及其品质研究[J].食品与机械,2015,1:186-189
SU He, YANG Rui-jin, ZHAO Wei, et al. Preparation of salted eggs with low salt [J]. Food and Machinery, 2015, 1: 186-189

[9] 苏鹤,杨瑞金,赵伟,等.咸鸭蛋的快速腌制及品质控制技术研究进展[J].食品研究与开发,2016,37(17):205-208
SU He, YANG Rui-jin, ZHAO Wei, et al. The research progress in fast curing and quality control technology of salted duck egg [J]. Food Research and Development, 2016, 37(17): 205-208

[10] Sirvente H, Beaumal V, Gaillard C, et al. Structuring and functionalization of dispersions containing egg yolk, plasma and granules induced by mechanical treatments [J]. J Agric

Food Chem., 2007, 55(23): 9537-9544

[11] 孙嘉文,卢晓明,韩兆鹏,等.冷冻对蛋黄,蛋黄微粒和蛋黄浆液乳化性质的影响[J].食品工业,2014,9:100-103
SUN Jia-wen, LU Xiao-ming, HAN Zhao-peng, et al. Effect of freeze on emulsifying properties of egg yolk, granule and plasma [J]. Food Industry, 2014, 9: 100-103

[12] Laca A, Sáenz M C, Paredes B, et al. Rheological properties, stability and sensory evaluation of low-cholesterol mayonnaises prepared using egg yolk granules as emulsifying agent [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 243-252

[13] 周长旭.鸡蛋热诱导凝胶形成及凝胶特性的研究[D].南京:南京农业大学,2012
ZHOU Chang-xu. Study on heat-induced gel formation and gel properties of egg [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012

[14] Salvador P, Toldrà M, Saguer E, et al. Microstructure-function relationships of heat-induced gels of porcine haemoglobin [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23
(7): 1654-1659

[15] LI J, LI X, WANG C, et al. Characteristics of gelling and water holding properties of hen egg white/yolk gel with NaCl addition [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 1-7

[16] Croguennec T, Nau F, Brule G. Influence of pH and salts on egg white gelation [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(2): 608-614

[17] Pillet E, Duchamp G, Batellier F, et al. Egg yolk plasma can replace egg yolk in stallion freezing extenders [J]. Theriogenology, 2011, 75(1): 105-114

[18] Wakamatu T, Sato Y, Saito Y. On sodium chloride action in the gelation process of low density lipoprotein (LDL) from hen egg yolk [J]. Journal of Food Science,1983, 8(2): 507-512

[19] Kitabatake N, Shimizu A, Doi E. Preparation of heat-induced transparent gels from egg white by the control of ph and ionic strength of the medium [J]. Journal of Food Science, 1988, 53(4): 1091-1095

[20] Mcbee L E, Cotterill O J. Ion-exchange chromatography and electrophoresis of egg yolk protein [J]. Journal of Food Science, 1979, 44(3): 656-667

[21] Amanda L, Benjamín P, Mario D. A method of egg yolk fractionation. characterization of fractions [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4): 434-443

[22] 范劲松.咸蛋黄分离腌制关键技术与品质形成机理探究[D].武汉:华中农业大学,2011
FAN Jin-song. Study on key technology and formation mechanism of salted egg yolk using fresh egg yolk [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011

[23] 吴玲.咸蛋低钠脉动压腌制新技术的研究[D].武汉:华中农业大学,2011
WU Ling. Study on new technology of salted egg preservation with mixed low-sodium and pulse pressure [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011

[24] 阎微,苏晓蓉,杨严俊.蛋黄组成成分的性质研究[J].食品工业科技,2010,1:158-160
YAN Wei, SU Xiao-rong, YANG Yan-jun. Study on the properties of composition of egg yolk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 1: 158-160

[25] Anton M. Egg yolk: structures, functionalities and processes [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2013, 93(12): 2871-2880

[26] Wang Y L, Wei Y. Rheological properties of κ-carrageenan -konjac gum mixed gel and their influence factors [J]. Food Science, 2011

[27] Woodward S A, Cotterill O J. Texture and microstructure of cooked whole egg yolks and heat-formed gels of stirred egg yolk [J]. Journal of Food Science, 2010, 52(1): 63-67

[28] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W, et al. Effect of sodium chloride and osmotic dehydration on viscoelastic properties and thermal-induced transitions of duck egg yolk [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(2): 367-376