咸蛋腌制添加抗氧化剂改善蛋黄的内质特性

孙静[1]，杜金平[1]，杨华[2]，向俊[3]，胡天平[4]

（1.湖北省农业科学院畜牧兽医研究所，湖北武汉 430064）（2.浙江省农业科学院，浙江杭州 310021）

（3.湖北神丹健康食品有限公司，湖北武汉 430070）（4.湖北天湖蛋禽有限责任公司，湖北荆州 433300）

摘要：为解决实际生产中咸蛋黄硬心、黑圈的问题，将三种天然抗氧化剂应用于咸蛋包泥腌制工艺中，比较其对咸蛋内质理化指标的影响。试验结果表明：料泥中添加茶多酚、虾青素、酵母硒不改变咸蛋成熟期（19 d），可显著减小蛋黄硬心质量比（5.75%、6.68%、9.06%，对照 15.32%）和抑制黑圈生成（1%~6%、2%~5%、8%~15%，对照 18%~41%）、且黑圈颜色浅，呈现浅灰色；蛋黄的硬度、弹性、咀嚼性显著降低。茶多酚与虾青素组较对照组可分别降低脂质初级氧化产物共轭二烯酸比率 37.50%和 31.25%，次级氧化产物丙二醛含量分别减少 23.31%和 41.56%（p<0.05），酵母硒影响不显著（p>0.05）。蛋黄的游离脂肪酸种类基本不变，相对含量略有变化：茶多酚组和虾青素组的不饱和脂肪酸总量、油酸、亚油酸含量较对照组显著增大，酵母硒组与对照组差异不显著。综合来看，蛋黄感官品质较对照组大幅提升，蛋黄色泽呈现橙红色，蛋黄脂质氧化分解程度减轻。鉴于茶多酚原来成本更低，茶多酚最适用于盐浸泥涂包法快速生产咸蛋。

关键词：咸蛋；抗氧化剂；脂质氧化；黑圈；硬心

文章篇号：1673-9078(2021)01-182-191 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.01.0619

Adding Antioxidants during Pickling to Improve the Interior Quality of Salted Egg Yolk

SUN Jing[1], DU Jin-ping[1], YANG Hua[2], XIANG Jun[3], HU Tian-ping[4]

(1.Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (2.Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China) (3.Hubei Shendan Healthy Food Co. Ltd., Wuhan 430070, China) (4.Hubei Tianhu Egg Poultry Co. Ltd., Jingzhou 433300, China)

Abstract: In order to solve the hard-core and black-circle problems of salted egg yolk in actual production, three natural antioxidants were added to the coating mud for salted eggs during pickling, and their effects on the physical and chemical indices of salted egg interior quality were compared. The results showed that the addition of tea polyphenols, astaxanthin, and yeast selenium to the mud did not change the maturity period of salted eggs (19 d), but significantly reduce the mass ratio of yolk hard core to whole yolk (5.75%, 6.68%, 9.06%, respectively, with 15.32% for the control), and inhibited the formation of black circles (1%~6%, 2%~5%, 8%~15%, respectively, with 18%~41% for the control). The treated eggs had black circles in lighter color (light gray color) and significantly reduced hardness, springiness and chewiness. Compared with the control group, the tea polyphenols and astaxanthin groups had decreased ratios of the primary oxidation product, conjugated dienoic acid (CDA; by 37.50% and 31.25% respectively),decreased contents of the secondary oxidation product malonaldehyde (MDA; by 23.31% and 41.56% respectively) (p<0.05), and insignificant changes of yeast selenium (p>0.05). Compared with the control group, the types of free fatty acids in the treated egg yolk essentially remained unchanged, but their relative contents changed slightly: the total content of unsaturated fatty

引文格式：

孙静,杜金平,杨华,等.咸蛋腌制添加抗氧化剂改善蛋黄的内质特性[J].现代食品科技,2021,37(1): 182-191

SUN Jing, DU Jin-ping, YANG Hua, et al. Adding antioxidants during pickling to improve the interior quality of salted egg yolk [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 182-191

收稿日期：2020-07-03

基金项目：现代农业产业技术体系水禽体系专项资金资助项目（CARS-42-26）；湖北省动物胚胎工程与分子育种重点实验室项目（2020ZD108）；湖北省科技支撑计划项目（2018ABA112）

作者简介：孙静（1986-），女，助理研究员，研究方向：蛋类加工研究

通讯作者：杜金平（1963-），男，研究员，研究方向：家禽育种与产品加工研究

acids, oleic acid, and linoleic acid increased significantly for the tea polyphenol group and the astaxanthin group, with those of the yeast selenium group exhibiting insignificant changes. Taken together, the organoleptic quality of the treated egg yolk was greatly improved, with orange-red color detected in the yellow color of egg yolk and a reduced degree of lipid oxidation/decomposition of egg yolk, compared with the control group. Considering the lower original cost of tea poly-phenols, tea polyphenols are most suitable for the rapid production of salted eggs by the salt-infused mud coating method.

Key words: salted eggs, antioxidants, lipid oxidation, black circles, hard core

咸蛋在我国有 600 年制作和食用历史，以其独特风味而倍受消费者喜爱[1]。传统的包泥法是采用红黏土与一定浓度食盐水调配成稠度适宜的腌制泥浆，包裹新鲜鸭蛋来腌制咸蛋，相比大缸水腌制作法，具有低盐慢进、蛋白咸度适中、蛋黄松沙富油的特点，缺点是制作周期长达 30 d 以上[2]。为了加快咸蛋腌制，多采用提高腌制环境温度、酸或碱浸渍、增压或减压的方法来缩短咸蛋成熟期[3]，可将咸蛋成熟期大幅缩短至 20 d 以内，但变温处理存在咸蛋黄黑圈增多、蛋黄硬心或硬化的问题[4]，既影响咸蛋外观品质、又影响咸蛋口感；酸或碱渍易造成蛋壳变脆变薄，破损率大幅升高会提高蛋加工企业的生产成本[5]；压力改变本身对于浸渍在水腌液中的咸蛋的影响主要源自压力造成的温度改变来改变盐分渗透速率[3,6,7]，在加压或减压过程还会造成蛋内外压力变化而破壳，这些都影响了咸蛋的品质[8]。目前采用无机酸处理蛋壳，不仅有刺激性味道，对蛋内质也有一定影响[7]，如蛋白过咸、蛋白发黄、硬度变大等问题[8]。同时，在腌制过程中，无机酸与空气中的二氧化碳发生中和反应而失效，不合适作为包泥法添加剂。本研究采用酸性缓冲液在 5.8~8.0 范围内具有较强的缓冲能力，可保证在咸蛋腌制期内裹蛋的料泥 pH 始终呈现酸性。

蛋黄是含蛋白质、脂肪和水的一个复杂体系。咸蛋的腌制过程中由于高盐作用使蛋黄收缩、凝固、硬化，咸蛋成熟后灭菌熟制操作后可促使蛋黄起砂出油。咸蛋黄的黑圈被认为是咸蛋在熟制后形成于蛋白与蛋黄交界处的一层灰黑色或浅灰色的含硫、铁的螯合物，因为呈圈状，故称黑圈；硬心是蛋黄中心未凝固起砂的、缺乏弹性的一个硬结，颜色为浅黄色或白色。黑圈和硬心会影响咸蛋感官品质、食用品质[9]。脂肪氧化一方面有利于形成咸蛋特有风味，但氧化过度会产生油哈味等不宜人气味，且会影响保质期[9]。

茶多酚具有良好的抗氧化性和抑菌性，多应用于食品保鲜中[10]。虾青素是一种酮式类胡萝卜素，可作为抑制脂质过氧化的抗氧化剂[11]。硒在生物体内可起到抗应激、抗氧化的作用，可添加酵母硒等物质、通过动物转化来人工转化富硒肉、乳、蛋制品[12]。

本研究在传统的包泥法基础上，在料泥中添加了课题组前期腌制的抗氧化助剂来腌制咸蛋，比较了集中不同成分的腌制助剂加工的咸蛋与传统黄泥腌制咸蛋理化指标的差异，特别对咸蛋黄黑圈情况、硬心情况、游离脂肪酸进行了比较，探讨了抗氧化助剂应用与包泥法腌制咸蛋的可行性，以期解决咸蛋品质问题。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

鸭蛋，购自湖北天湖蛋禽有限责任公司；食盐，市售飞鹤牌；茶多酚，湖州荣凯植物提取有限公司，纯度>98%；虾青素，江苏鑫瑞生物科技有限公司，纯度≥5%；酵母硒，安琪酵母股份有限公司，纯度 0.2%；铬酸钾、氯化钠、硝酸银、异辛烷、EDTA、三氯乙酸、丙二醛、磷酸分析纯。

DHG930A 型烘箱，上海精宏实验设备有限公司；FJ-200 型均质机，上海标本模型厂；TA.XT.plus 型质构仪，英国 stable micro system；Nanodrop 型紫外分光光度计，美国热点；5890 型气相色谱，安捷伦；通风橱，武汉新天；R301 型恒温水浴锅，巩义市英峪高科仪器厂。

1.2 试验分组与鸭蛋腌制方法

试验采用包泥法盐腌制咸蛋。共设 3 个试验组，每组 3 个重复，每个重复 100 个鸭蛋。腌制浓度为蛋均含盐 4.8 g。A 组为茶多酚助剂变温腌制，变温条件为 1~5 d 为 18 ℃，6~12 d 为 40 ℃，13 d 至成熟为常温 20 ℃。B 组为虾青素助剂变温腌制，变温条件同 A。C 组为酵母硒助剂变温腌制，变温条件同 A。D 组为无助剂变温腌制对照，变温条件同 A。A、B、C 组料泥中茶多酚或虾青素或酵母硒的添加量为料泥质量的 0.3%。pH 为 6.00，D 组 pH 为 6.80。

1.3 蛋白及蛋黄含盐率的测定

分别随机抽取每组中 5 枚咸蛋，做 3 个重复，将每枚咸蛋蛋清与蛋黄完全分离后，用玻璃棒将蛋清搅拌均匀，称取 1 mL 蛋清液于锥形瓶中，加入 20 mL 去离子水，再加入 4~5 滴 50 g/L K_2CrO_4 溶液，边摇动

边用标定好的 $AgNO_3$ 溶液滴定至溶液呈砖红色即为终点[3]。含盐率按下式计算：

$$NaCl/\% = c(V_1 - V_2)M/(1000m_1)$$

式中，c: $AgNO_3$ 溶液浓度，mol/L; m_1: 取样质量，g; M: NaCl 的摩尔质量，58.44 g/mol; V_1: 消耗 $AgNO_3$ 溶液的体积，mL; V_2: 空白消耗 $AgNO_3$ 溶液的体积 mL。

蛋白蛋黄含盐比即为同组蛋白含盐率与蛋黄含盐率的比值，单位为%。

1.4 咸蛋的感官评价

咸蛋的感官评价标准（见表 1 所示）采用 100 分制，每个样品分别由 10 名训练有素的人员（男女各半）按照相应的标准对咸蛋进行评定，取各项平均值进行统计[8]。

表 1 咸蛋感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of slated eggs

项目	指标	评分
蛋壳（10 分）	蛋壳干净完整，无黑斑，无裂纹	5~10
蛋白（30 分）	蒸煮后蛋白完整，乳白色，不粘壳，蛋白无“蜂窝状”现象	20~30
蛋黄（30 分）	蒸煮后的蛋黄有明显的出油现象，无黑圈，无白心，呈橙黄、朱红或橘红色凝聚	20~30
风味（30 分）	咸度适中，蛋白细嫩，蛋黄松沙可口、出油率高，入口有咸蛋特有的香味	20~30

1.5 黑圈硬心的统计

熟咸蛋制后分离蛋白和蛋黄，蛋黄外层有明显一层灰黑色物质，即记为有黑圈，有深灰色或黑色圈的蛋黄个数占全部蛋黄个数的比例记为黑圈率；有浅灰色蛋圈的蛋黄个数占全部蛋黄个数的比例记为浅暗圈率。

剖开蛋黄后，蛋黄内部有浅黄色或白色硬块，即记为有硬心，有硬心的蛋黄个数占全部蛋黄个数的比例即为硬心率，硬心质量占整个蛋黄总质量的比值即为硬心质量比（硬心大小）。

1.6 蛋黄质构特性的测定

采用物性测定仪测定熟蛋黄的质构性质[13]。整个蛋黄样品采用压缩柱状铝探针（型号为 P36R）压缩，每个样品做 2 次轴向压缩，蛋黄形变为 20%，测定均在室温完成。力距形变测前速率 5 mm/s，测后速率 5 mm/s，测试速率 1 mm/s，触发力 5 g，记录。对质构曲线通过软件分析得到硬度、弹性和咀嚼性等质构参数。

1.7 咸蛋黄初级氧化产物的测定

取 100 mg 样品油，放入 250 mL 带塞的三角瓶中，随后加入 25 mL 异辛烷将油脂振荡溶解，暗处静置 10 min，将其用异辛烷稀释 10 倍，用 UV-Vis 在 233 nm 波长测吸光值（异辛烷做空白），每组测 3 次平行，求平均，代入以下公式，求得 CDA 在油脂中的百分比（%）[14]：

$$CDA/\% = (0.84 \times A_{223nm}) \div (bc/k_0)$$

式中：$A_{233\,nm}$: 蛋黄油在 233 nm 下的吸光值; b: 比色皿光径(1 cm); c: 待测溶液浓度(g/L); k_0: 酸类吸光系数，0.03。

△CDA 为试验组的 CDA 与对照组 CDA 的差与对照组 CDA 的比值，单位为%。

1.8 咸蛋黄次级氧化产物的测定

取 5.00 g 蛋黄样于 50 mL 离心管中，加 25 mL、20% TCA（三氯乙酸含 0.1% EDTA）和 20 mL H_2O，在冰水浴中用高速匀浆机以 3000 r/min 转速匀浆 60 s，静置 1 h 后于 2000 g、4 ℃条件下离心 10 min，过滤，滤液用双蒸水定容至 50 mL，取 5 mL 滤液加入 5 mL TBA（0.02 M）在沸水浴中反应 20 min，取出用流动水冷却 5 min，然后用紫外-可见分光光度计测定 532 nm 下的吸光度，空白样：25 mL、20% TCA 用双蒸水定容至 50 mL，再取 2 mL 滤液加入 2 mL TBA（0.002 mol/L）。TBARs 值通过标准曲线来计算，结果表示为 mg 丙二醛(MDA)/kg 蛋黄[15]。

标准曲线制作：准确吸取相当于丙二醛 10 μg 的标准溶液 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mL 置于纳氏比色管中，加水至总体积为 5 mL，加入 5 mL TBA 溶液，然后按样品测定步骤进行，测得光密度绘制标准曲线。

△MDA 为试验组的 MDA 与对照组 MDA 的差与对照组 MDA 的比值，单位为%。

1.9 脂肪酸组成测定

气相色谱仪型号为 5890，选用脂肪酸专用柱 DB-23，60.0 m×250 μm×0.25 μm；检测器温度：280 ℃；氢气流速：40 mL/min；空气流速：450 mL/min；程序升温：100 ℃为起始温度，以 8 ℃/min 的速度上升至 175 ℃，随后以 3 ℃/min 的速度上升至 230 ℃，保持 10 min。以氮气作为载气，分流比为 20:1。每次进样 1 μL，每个样品重复三次[14]。

1.10 数据处理

所有数据分析采用 Excel 建立数据库，用 SPSS19.0 软件进行数据处理分析，数据采用 Mean±SD 表示，相关性分析采用 Excel 中的数据处理功能得到指标间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 咸蛋成熟期及含盐率的比较

咸蛋成熟期及蛋白蛋黄含盐率结果如表 2 所示。料泥中添加抗氧化剂对咸蛋成熟期没有影响，仍为 19 d。

添加抗氧化剂的咸蛋白含盐率均比对照组低，A 组蛋白含盐 3.69%±0.06%显著低于对照组的 4.70%±0.56%（p<0.05），B、C 组（4.31%~4.33%）与对照无显著性差异（p>0.05）；4 组蛋黄含盐率相近（1.37%~1.46%），不具有显著性差异（p>0.05）。郑华等人[16]在蛋均含盐 5.83 g 条件下包草木灰腌制咸蛋时，对蛋白含盐率对腌制时间进行线性拟合，得到 Y=0.2385X+0.5803（R^2=0.99），本试验腌制采用蛋均含盐 4.80 g 条件包泥腌制，根据腌制盐浓度越大、含盐率成比例增加的原则，在方程中得到的蛋白含盐率为 4.21%，与测定的对照 D 组 4.70%结果相近。与吴文锦等人[16]研究包泥法研究咸蛋腌制期与贮藏期中的蛋内含盐情况也一致。

蛋白蛋黄含盐比可描述蛋白和蛋黄咸度均衡程度，在前期试验研究中发现咸蛋白含盐率总体随时间延长而升高，但中间会随蛋黄含盐率快速升高、蛋白含盐率有小幅降低再升高的现象[3]；待蛋黄含盐率达到 0.8%时蛋黄开始出油，达到 1%时蛋黄出油率较多[17]。蛋白含盐率和蛋黄含盐率并不是越高越好，当食品含盐率>4.5%时，口感会咸涩，蛋白含盐率 3%时感官上认为咸度适中，处于 3%~4.5%时咸度在可接受范围[3]。所以当蛋白含盐率≤4.5%，蛋黄含盐率>1%时，咸蛋蛋白不咸、蛋黄咸鲜出油[16]，此时蛋白蛋黄含盐比<4.5；当蛋白含盐率在 3%左右，蛋黄含盐率≥1%时，蛋白咸度较低，蛋黄咸度适中，蛋黄出油量大，此时蛋白蛋黄含盐比≤3。但盐分是因为蛋白、蛋黄中存在浓度差而从蛋白进入蛋黄，该比值不会无限度的低。A、B、C 组蛋白蛋黄含盐比均低于 3，口感咸度适中，D 组蛋白蛋黄含盐比略大于 3，稍显偏咸，各组间不具有显著性差异（p>0.05）。A、B 组咸蛋黄含盐低，一方面是因为腌制时间短、盐分进入蛋黄较少，另方面可能是因为蛋黄膜受腌制助剂的抗氧化成分影响而在腌制期内保持较好的形态和通透性[18]。

表 2 咸蛋成熟期与含盐率结果

Table 2 Ripening period and salt content of salted egg

项目	A	B	C	D
成熟期/d	19	19	19	19
蛋白含盐率/%	3.69±0.06^b	4.31±0.11^a	4.33±0.11^a	4.70±0.56^a
蛋黄含盐率/%	1.37±0.48^a	1.44±0.02^a	1.46±0.01^a	1.45±0.02^a
蛋白蛋黄含盐比	2.69±0.13^b	2.99±0.05^a	2.97±0.10^a	3.24±0.28^a

注：同行相同字母表示差异不显著（p<0.05）。下表 3、4、6、7 同。

表 3 咸蛋感官评分

Table 3 The sensory score of salted egg

项目	A	B	C	D
蛋壳	10.00±0.00^a	10.00±0.00^a	10.00±0.00^a	9.80±0.00^b
蛋白	28.50±0.50^a	28.20±0.50^a	25.00±0.50^b	23.30±0.50^c
蛋黄	28.60±0.30^a	28.00±0.30^a	23.80±0.00^b	20.20±0.20^c
风味	27.30±0.70^a	26.50±0.20^b	26.30±0.10^b	26.20±0.10^b
总分	94.40±0.38^a	92.70±0.25^b	85.10±0.15^c	79.50±0.20^d

2.2 咸蛋感官评价

对咸蛋蛋壳、蛋白、蛋黄及风味进行分项感官评价，结果如表 3。咸蛋感官评分各组具有显著性差异（p<0.05），评分高低依次为：A>B>C>D。添加了茶多酚的咸蛋感官评分最高。抗氧化剂的使用，均未见对咸蛋壳产生不利影响，各组蛋壳完整洁净，无污渍，对照组洗净后蛋壳偶有泥污印迹，蛋壳评分 9.80，A-C 组添加抗氧化剂后蛋壳评分 10.00，略有提升；蛋白完整无蜂窝状，嫩白光滑，A、B 组蛋白咸度适宜，评分较高（28.50、28.20），两者不具显著性差异，C、D 组咸度略大，仍在适口范围内，感官评分略低（25.00、

23.30），A、B、C 与 D 组有显著性差异（p<0.05）；4 组蛋黄差异显著（p<0.05），D 组蛋黄与蛋白交界处多见灰黑色的黑圈，黑圈比例高且厚，颜色深，A、B、C 组黑圈发生比例较少，且黑圈颜色浅，为薄薄的一层浅灰色；A、B 组蛋黄松沙出油，剥开蛋白即有大量油滴渗出、流下，C 组松沙感强，但出油量较 A、B 组少，肉眼可见或挤压后出油，但不流下。D 组外层蛋黄出油尚可，但蛋黄中心有较大未成熟部分，呈现浅黄色硬心。4 种咸蛋均有良好咸鲜风味，无不宜人气味。

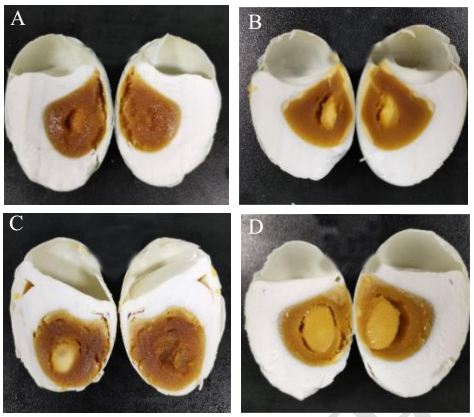


图 1 咸蛋黄硬心直观图

Fig.1 The hard core of salted egg yolk

注：A：茶多酚组；B：虾青素组；C：酵母硒组；D：对照组。下图同。

2.3 咸蛋黄硬心和黑圈的比较

咸蛋黄品质好坏极大程度决定了咸蛋品质的好坏，而咸蛋黄黑圈和硬心问题，与出油率共同决定了蛋黄品质的等级[6]。咸蛋黄硬心、黑圈直观图如图 1、图 2 所示，硬心率和黑圈率统计见表 4。抗氧化剂的添加对蛋黄硬心发生率未见显著减少（10%~13%），但对硬心大小有显著影响，A、B、C 组蛋黄硬心较 D 组明显缩小（5.75%、6.68%、9.06%，对照 15.32%）（p<0.05）。添加抗氧化剂可显著抑制蛋黄黑圈生成、且黑圈色浅，蛋黄黑圈从少到多依次为：茶多酚（1%~6%）<虾青素（2%~5%）<酵母硒（8%~15%）<对照（18%~41%）。添加抗氧化剂后，黑圈率可显著降低到 1%，浅暗圈率降低到 3%。咸蛋的硬心发生原因可能与蛋鸭产蛋期蛋白饲料添加棉粕、菜粕过量造成蛋鸭肠道消化酶异常有关[19]，现有研究未见对腌制工艺对咸蛋黑圈发生率影响的报导。

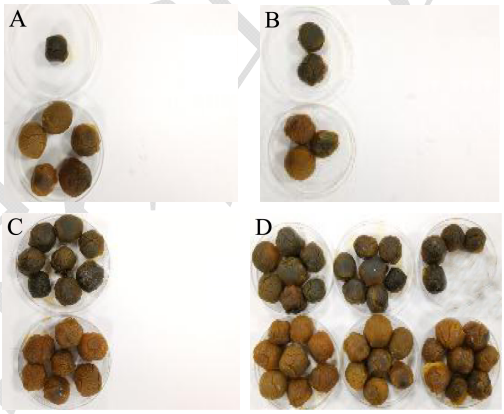


图 2 咸蛋黄黑圈直观图

Fig.2 Black circle of salted egg yolk

表 4 咸蛋黄的黑圈率、硬心率、质构特性及色度情况

Table 4 Statistics of salted egg yolk black circle rate, hard heartrate, TPA and chromaticity

项目	A	B	C	D
黑圈率/%	1.00±0^{d}	2.00±0^{c}	8.00±0^{b}	18.00±0^{a}
浅暗圈率/%	5.00±0.06^{c}	3.00±0.03^{d}	7.00±0.06^{a}	23.00±0.02^{b}
硬心发生率/%	10.00±1.00^{a}	10.00±1.00^{a}	11.00±1.00^{a}	13.00±2.00^{a}
硬心质量比/%	6.68±0.15^{c}	5.75±0.33^{c}	9.06±0.14^{b}	15.32±0.08^{a}
蛋黄硬度/N	4.16±0.02^{c}	4.78±0.02^{c}	6.59±0.18^{b}	8.30±0.06^{a}
蛋黄弹性	0.22±0.01^{d}	0.28±0^{c}	0.35±0^{b}	0.43±0.01^{a}
蛋黄咀嚼性/(g·mm)	32.07±0.17^{d}	34.71±0.09^{c}	52.41±0.87^{b}	95.93±2.14^{a}
L*	72.78±1.12^{a}	66.78±0.17^{b}	62.12±0.22^{c}	59.03±0.11^{b}
a*	14.30±0.05^{a}	10.32±0.15^{c}	10.26±0.06^{c}	8.97±0.12^{c}
b*	54.30±0.11^{a}	51.51±0.27^{b}	47.99±0.45^{c}	43.69±0.13^{c}
△E	91.92±0.13^{a}	84.97±0.35^{b}	79.17±0.50^{c}	73.99±0.21^{d}

2.4 咸蛋黄质构特性的比较

表 4 中列出各组蛋黄的质构特性：硬度、弹性、咀嚼性。A、B、C 组的硬度、弹性、咀嚼性均显著小于 D 组。A、B 组硬度、弹性小，且与 C、D 组具有显著性差异，四组咀嚼性均具有显著性差异，D 组咀嚼性是 A、B 组的近 3 倍，是 C 组的近 2 倍。通过相关性分析，结果如表 5 所示，结果表明，咸蛋黄的弹性、

硬度、咀嚼性之间，相关系数分别为 0.99、0.96、0.93，均大于 0.8，具有强的正相关。咸蛋黄硬心的存在对蛋黄质构也具有强相关性：硬心发生率与硬度、弹性、咀嚼性相关性分别为 0.96、0.94、0.99，硬心质量比（硬心大小）与硬度、弹性、咀嚼性相关性分别为 0.94、0.90、0.99。硬心大的 D 组蛋黄硬度、弹性、咀嚼性均显著大于硬心小、比例少的添加了抗氧剂的试验组蛋黄。

表 5 指标间相关性分析

Table 5 Results of correlation analysis

项目	硬心发生率	硬心质量比	硬度	弹性	咀嚼性
硬心发生率	1				
硬心质量比	0.99	1			
硬度	0.96	0.94	1		
弹性	0.94	0.90	0.99	1	
咀嚼性	0.99	0.99	0.96	0.93	1

2.5 咸蛋黄色度的比较

咸蛋黄的色度测定结果如表 4 所示。由表 4 可知，L*值 A>B>C>D，这可能是 A、B、C 组蛋黄渗油量多，油滴的渗出使蛋黄反光、亮度提升[13]，A 组的出油更多、L*更大；a*值反映了蛋黄的黄绿值，a*值越大，红度越大，a*值 A>C>B（分别为 14.30、10.26、10.32），A 组蛋黄呈现最（橙）红的色泽，而使其 a*值最大，B 组 a*值低于 C 组可能是变温造成蛋黄黑圈的生成而降低了蛋黄的红色色泽，这进一步说明助剂的添加可降低蛋黄（暗）黑圈的形成，使蛋黄色泽呈现良好的橙红色。其中 A 组茶多酚的添加，咸蛋的亮度最大，红值最高，色度值最大，分别较对照组高 23.29%、59.42%、24.23%，这结果与茶多酚具有优越的护色作用的原理相一致[20]，能起到促进蛋黄类胡萝卜素发色的效果。未见对咸蛋腌制料液或料泥中添加抗氧化剂后蛋黄色度的相关研究报导。

2.6 咸蛋黄氧化产物比较

鸭蛋黄富含脂质，在咸蛋加工过程中，食盐腌渍与储藏等条件均会造成不同程度的脂质氧化分解[21]。鲜鸭蛋腌渍时间越长，脂质氧化程度越高[22]，氧化产物分为初级氧化产物和次级氧化产物。为了评价不同抗氧化剂对咸蛋黄脂质氧化程度的影响，以共轭二烯酸值表示脂质初级氧化产物，以丙二醛代表脂质次级氧化产物，测定结果如表 5 所示。

共轭二烯酸值（CDA）是衡量初级氧化程度的重要指标[20]，表示了多不饱和脂肪酸氧化分解。如表 6 结果可知，添加抗氧化剂后，A、B 组咸蛋黄的 CDA 值较 D 组显著降低 30%以上（p<0.05），说明抗氧化剂可有效抑制脂肪初级氧化反应，且 A 组茶多酚效果较 B 组的虾青素的抑制作用更强，A、B 组较 D 组的 ΔCDA 分别为-37.50%、-31.25%，具有显著性差异（p<0.05）。茶多酚具有良好的抗氧化性和抑菌性，多应用于食品保鲜中[10]。茶多酚对咸蛋黄脂质氧化的抑制作用强，除了本身的抗氧化性外，可能还与其抑菌性有关，通过抑制微生物的增殖、减少了微生物生长过程对咸蛋内包括脂质在内营养成分的消耗，也极大程度的降低了初级氧化。李蕊[23]发现添加 0.03%茶多酚与维生素 C 和维生素 E 协同对食用油脂具有抗氧化活性、延长食用油的货架期，而蛋内也存在维生素，对鸭蛋黄脂肪氧化的抑制可起增效作用。茶多酚易溶于水，从包裹鸭蛋的泥浆中进入鸭蛋内部，鸭蛋白中含水率高，所以较虾青素能更多透过蛋白进入蛋白与蛋黄的交界处，从外层蛋黄处即开始发挥抗氧化作用；虾青素是一种酮式类胡萝卜素，为脂溶性，不易溶于水[24]，其依赖蛋白中的少量脂质进入蛋黄，一旦进入蛋黄后可较好的溶于蛋黄脂质中，在整个蛋黄中起到抗氧化作用。茶多酚和虾青素在咸蛋抗氧化作用中各有特点，后期研究可考虑将两者复合，通过协同作用进一步提高抗氧化剂抗氧化作用，强化品质改良效果。

丙二醛（MDA）是脂质次级氧化产物，可作为反映脂质过氧化速率和强度的重要参数。A、B 组 MDA 值（15.50 μg/g、11.81 μg/g）较 D 组（20.21 μg/g）均显著降低 23.31%、41.56%，说明茶多酚和虾青素可显著抑制脂质次级氧化反应（p<0.05）。其中，A 组的次级氧化产物低于 B 组，这可能与 A 组蛋黄出油量大，达到峰值，盐渍及变温对脂质次级氧化产物的生成有一定的抑制作用[14]，这一现象可以说明添加抗氧化剂可使咸蛋黄更耐储；B 组中的虾青素对咸蛋黄脂质 MDA 值降低效果与 A 组的茶多酚更强，且均有显著性差异（p<0.05）。结合 A、B 组的初级氧化产物来看，A 组有较低的初级氧化产物、较高的次级氧化产物，随着腌制过程的进行，鸭蛋内水分不断向蛋外移动，会减少水溶性茶多酚的进入，从而影响其抑制脂质次级氧化成小分子产物[14]。这与付晶等[25]人采用茶多酚干预后明显改善了 H_2O_2 导致的动物上皮细胞内脂质过氧化产物 MDA 和糖酵解酶 LDH 产生，且抑制 H_2O_2 导致的抗氧化酶系 SOD 和 GSH-Px 活性降低（p<0.05）的研究结果一致。虾青素因其具有共轭双键长链结构，在长链的 2 端有羟基和羰基基团，使其易被氧化，因此在体内外均有很强的生物抗氧化活性[23]。料泥中添加虾青素，在腌制过程中虾青素可随盐分和水分的移动迁入蛋内，经过蛋白，进入蛋黄，抑

制蛋黄内脂质被腌渍而发生的氧化分解。酵母硒组MDA值较对照组有4.11%的升高，蛋不具有显著性差异，说明其对脂质氧化的抑制效果不显著（p>0.05）。硒元素是谷胱甘肽过氧化物酶的重要组成物质，可参与具有还原性的谷胱甘肽和过氧化物的氧化还原反应而具有优良的抗氧化作用[26]，在蛋鸡饲料配方中多见添加酵母硒来提高家禽肝脏、血液、蛋内的抗氧化能力和脂代谢水平，如司雪阳[26]发现在亚麻籽饲粮中添加0.6 mg/kg酵母硒可显著降低蛋鸡肝脏MDA含量，并达到蛋中富集硒和ω-3PUFA的效果；何柳青等[27]发现在蛋鸡日粮中添加400 mg/kg茶多酚和0.25 mg/kg酵母硒具有互作效应，可减缓鸡蛋在贮藏过程中哈氏单位的下降，提升蛋黄色度，降低蛋黄胆固醇含量；杨玉等[28]在产蛋后期蛋鸡的饲粮中添加0.2 mg/kg的酵母硒极显著提高了血浆总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性（p<0.01），显著降低了血浆MDA含量，改善机体抗氧化性能和胆固醇代谢能力。而将酵母硒应用与咸蛋腌制的研究尚未见报道。

不同的加工与储藏等条件均会造成不同程度的脂质氧化分解[21]。适度的脂质次级氧化会生成例如醛类、酮类、醇类及酸类小分子挥发性物质，一定数量的这些物质对食品风味是有一定促进作用的。蛋黄中的脂肪氧化酶活性与脂质的酶促氧化联系紧密[29]。变温条件下，包泥快速腌制的咸蛋黄加剧了蛋黄脂质的氧化分解，这可能是脂肪氧化酶活性随腌制温度的升高而提升[14,21]，而龙门等人[29]发现升高腌制温度会降低蛋黄中脂质初始氧化反应的活化能，从而促进脂质氧化，这两个因素都造成蛋黄脂质分解加速。微酸性环境与适宜的温度可将酶活控制在合理范围[30,31]，茶多酚对咸蛋黄抗氧化效果突出，可能与茶多酚在上述条件下效能高而使其可以发挥作用有关。既保障了蛋黄脂质产生良好的氧化以具有其特有的独特风味，又不至于过度氧化而产生不宜气味、影响保质期[25,32]。这对保障咸蛋，特别是咸蛋黄品质具有重要意义。

表6 咸蛋黄氧化产物测定结果

Table 6 Determination of oxidation products of salted egg yolk

项目	A	B	C	D
CDA/%	0.010±0.00^{c}	0.011±0.00^{b}	0.016±0.00^{a}	0.016±0.00^{a}
ΔCDA/%	-37.50±0.06^{c}	-31.25±0.05^{b}	0.00^{a}	0.00^{a}
MDA/(μg/g)	15.50±0.12^{b}	11.81±0.06^{c}	21.04±0.07^{a}	20.21±0.13^{a}
ΔMDA/%	-23.31±0.05^{b}	-41.56±0.03^{c}	4.11±0.06^{a}	0.00^{a}

表7 咸蛋黄游离脂肪酸种类及含量

Table 7 Types and contents of free fatty acids in salted egg yolk

项目	A	B	C	D
肉豆蔻酸	0.41±0.03^{c}	0.44±0.05^{b}	0.48±0.05^{a}	0.41±0.02^{c}
肉豆蔻脑酸	0.04±0.00^{b}	0.04±0.00^{c}	0.05±0.00^{a}	0.04±0.00^{d}
棕榈酸	22.76±0.12^{c}	23.9±0.22^{c}	24.90±0.62^{a}	24.30±0.21^{b}
棕榈烯酸	3.17±0.02^{b}	3.20±0.01^{b}	3.35±0.12^{a}	3.35±0.06^{a}
硬脂酸	4.51±0.04^{a}	4.44±0.04^{b}	4.37±0.14^{b}	4.44±0.02^{b}
油酸	58.94±0.06^{a}	57.8±0.05^{b}	55.60±0.05^{d}	57.2±0.06^{c}
亚油酸	7.66±0.05^{b}	7.67±0.01^{b}	8.50±0.13^{a}	7.45±0.01^{c}
α-亚麻酸	0.33±0.01^{b}	0.32±0.02^{b}	0.34±0.01^{a}	0.30±0.02^{b}
顺-11-二十碳烯酸	0.38±0.01^{c}	0.41±0.02^{b}	0.47±0.02^{a}	0.39±0.01^{b}
顺-11,14,17-二十碳三烯酸	0.16±0.01^{b}	0.17±0.01^{b}	0.18±0.01^{a}	0.18±0^{a}
顺-8,11,14-二十碳三烯酸	1.44±0.02^{b}	1.32±0.01^{c}	1.49±0.02^{b}	1.63±0.08^{a}
顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸	0.18±0.01^{b}	0.21±0.02^{a}	0.20±0.01^{a}	0.21±0.01^{a}
饱和脂肪酸总量	27.69±0.07^{d}	28.80±0.08^{c}	29.70±0.05^{a}	29.10±0.08^{b}
不饱和脂肪酸总量	72.31±0.07^{a}	71.11±0.34^{a}	70.20±0.12^{b}	70.79±0.23^{b}
单不饱和脂肪酸总量	62.54±1.11^{a}	61.40±0.94^{a}	59.50±0.24^{b}	61.00±1.21^{a}
多不饱和脂肪酸总量	9.77±0.06^{b}	9.71±0.24^{b}	10.7±0.14^{a}	9.79±0.45^{b}

2.7 蛋黄游离脂肪酸变化的比较

蛋黄中富含脂肪酸，腌制 19 d 后各组咸蛋黄游离脂肪酸结果如表 7 所示。表 7 中可知，各组咸蛋黄脂肪酸的种类上基本一致，共检测出 12 种游离脂肪酸，与邵萍[8]、和丽媛[14]、徐姣姣[22]、潘康[33]等人测定的游离脂肪酸种类相同。各脂肪酸的相对含量变化较小。通过对比发现，咸蛋蛋黄中含量最高的不饱和脂肪酸为油酸（55.60%~57.80%），其次是棕榈酸（22.76%~24.90%）、亚油酸（7.45%~8.50%），不饱和脂肪酸总量 A>B>D>C，A、B（72.31%、71.11%）均与 D 组（70.79%）有显著性差异（p<0.05），C 组（70.20%）对不饱和脂肪酸的影响不显著，A、B 组之间差异不显著（p>0.05），即添加了茶多酚、虾青素后的咸蛋黄游离脂肪酸氧化分解量减少；油酸、亚油酸含量也呈现相似规律，且具有显著性差异（p<0.05）。游离脂肪酸的变化规律与脂质初级氧化与次级氧化产物结果一致。

3 结论

茶多酚与虾青素应用于咸蛋腌制、尤其是咸蛋快速腌制中，可显著改善蛋黄黑圈和硬心，改善咸蛋黄品质；可能有效抑制食盐腌渍和变温对脂质氧化的影响。在同等添加比例时，鉴于茶多酚比虾青素价格更低，可在料泥中优先选择添加 0.3%茶多酚来改善咸蛋内质品质。

参考文献

[1] 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

[2] 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

[3] 孙静,皮劲松,潘爱銮,等.咸蛋腌制剂低盐高渗替代物的筛选[J].湖北农业科学,2015,54(24):6334-6337,6341
SUN Jing, PI Jin-song, PAN Ai-luan, et al. Salted eggs pickled formulation screening of low hypertonic salt substitutes [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(24): 6334-6337, 6341

[4] 武秀香,岑宁,杨章平.咸蛋快速腌制工艺有关问题探讨[J].中国家禽,2011,33(3):56-57
WU Xiu-xiang, CEN Ning, YANG Zhang-ping. Discussion on the technology of rapid pickling of salted eggs [J]. China Poultry, 2011, 33(3): 56-57

[5] 张凯.鸭蛋壳的力学特性及多孔超微结构的渗透特性研究[D].武汉:华中农业大学,2012
ZHANG Kai. Research on meanchs of duck egg shells and its permeablity of porousultrastructure [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012

[6] 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,2011,32(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

[7] 李帅俊,凌刚.咸鸭蛋的快速腌制技术及改善其品质的研究[J].食品工业科技,2006,2:95-96
LI Shuai-Jun, LING Gang. Study on rapid curing technology and quality improvement of salted duck eggs [J].Science and Technology of Food Industry, 2006, 2: 95-96

[8] 邵萍,刘会平,邹乾,等.酸浸减压法腌制咸蛋与传统咸蛋的对比[J].食品工业科技,2017,38(18):8-13
SHAO Ping, Liu Hui-ping, ZOU Qian, et al. The contrast of salted eggs produced by soaking in acid combined with reduced pressure vacuum technology and the traditional method of brine immersion [J].Science and Technology of Food Industry ,2017, 38(18): 8-13

[9] LAI Kung-Ming, KO Wen-Ching, LAI Tsu-Han. Effect of NaCl penetration rate on the granulation and oil-off of the yolk of salted duck egg [J]. Food Science and Technology International Tokyo, 1997, 3(3): 269-273

[10] 龚易昕悦,周银颖,文建英,等.茶多酚与壳聚糖的复配在食品保鲜中的应用研究进展[J].保鲜与加工,2020,20(3):217-221,225
GONG Yi-xinyue, ZHOU Yin-Ying, WEN Jian-ying, et al. Progress on the application of tea polyphenols and chitosan in food preservation [J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 217-221, 225

[11] 江利华,柳慧芳,郝光飞,等.虾青素抗氧化能力研究进展[J].食品工业科技,2019,40(10):350-354
JIANG Li-hua, LIU Hui-fang, HAO Guang-fei, et al. Research progress on antioxidant ability of astaxanthin [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(10): 350-354

[12] 李为常,何伟东,潘柳初,等.酵母硒对中蜂的工蜂初生重、蜂蜜硒含量及抗氧化活性的影响[J].四川农业大学学报,2020,38(3):359-364
LI Wei-chang, HE Wei-dong, PAN Liu-chu, et al. Effects of yeast selenium on selenium content and antioxidant activity in honey, and on the birth weight of worker bees (*Apiscerana*) [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2020, 38(3): 359-364

[13] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W. Effects of salting processes and time on the chemical composition, textural properties, and microstructure of cooked duck egg [J]. Journal of Food Science, 2015, 76(2): S139-S147

[14] 和丽媛.不同加工方式对禽蛋脂质氧化及脂肪酸的影响[D].武汉:华中农业大学,2015
HE Li-yuan. The effect of different processing on lipid oxidation and fatty acid composition of eggs [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015

[15] Siu G, Draper H. A survey of the malonaldehyde content of retail meats and fish [J]. Journal of Food Science, 1978, 43: 1147-1149

[16] 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 Science, 2013, 34(1): 83-87

[17] 吴文锦,汪兰,张依洁,等.不同养殖及腌制方式下咸鸭蛋的贮藏期研究[J].中国家禽,2015,37(12):35-38
WU Wen-jin, WANG Lan, ZHANG Yi-jie, et al. Effect of different raising systems and salting methods on storage period of salted duck eggs [J]. China Poultry, 2015, 37(12): 35-38

[18] Kaewmanee Thammarat, Benjakul Soottawat, Visessanguan Wonnop. Effect of acetic acid and commercial protease pretreatment on salting and characteristics of salted duck egg [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(5): 1502-1510

[19] 阮栋,刘建高,陈伟,等.发酵饲料对蛋鸭产蛋性能、蛋品质、肠道消化酶活性及免疫功能的影响[J].动物营养学报,2019,31(12):5740-5749
RUAN Dong, LIU Jian-gao, CHEN Wei, et al. Effects of fermented feed on egg production performance, egg quality, intestinal digestive enzyme activity and immune function of laying duck [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(12): 5740-5749

[20] 杜密英,王敬涵,孙卉,等.茶多酚在预制调理食品中的应用研究[J].食品与发酵工业,2020,14:289-294
DU Mi-ying, WANG Jing-han, SUN Hui, et al. Research on application of tea polyphenol in prepared Foods [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 14: 289-294

[21] 和丽媛,马美湖,黄茜,等.蛋与蛋制品脂质氧化研究进展[J].中国家禽,2013,35(18):44-47
HE Li-yuan, MA Mei-hu, HUANG Xi, et al. Research progress on paper oxidation of egg and egg products [J]. China Poultry, 2013, 35(18): 44-47

[22] 徐姣姣,刘会平,杨晓兴,等.减压法快速腌制咸蛋及蛋黄中脂肪酸变化[J].食品科技,2015,6:102-107
XU Jiao-jiao, LIU Hui-ping, YANG Xiao-xing, et al. Speed up the process of salted eggs by vacuum technique and the changes of fatty acid in yolk [J]. Food Scienceand Technology, 2015, 6: 102-107

[23] 李蕊.茶多酚与维生素协同作用对食用油脂抗氧化活性的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2014
LI Rui. Effect of tea polyphenols and vitamins' s synergistic effect on the antioxidant activity of edible oil [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014

[24] 张舟艺,曲雪峰,胡文力,等.虾青素的检测及生物活性研究进展[J].食品安全质量检测学报,2020,11(5):1431-1438
ZHANG Zhou-Yi, QU Xue-feng, HU Wen-li, et al. Research progress on detection and biological activity of fast axanthin [J] Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(5): 1431-1438

[25] 付晶,林桐,陈艾玲,等.茶多酚对过氧化氢诱导鹅小肠上皮细胞氧化损伤的保护作用[J].东北农业大学学报,2020,51(4):61-69
FU Jing, LIN Tong, CHEN Ai-ling, et al. Protective effect of tea polyphenols on H_2O_2-induced oxidative stress in intestinal epithelial cells of goose embryo [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2020, 51(4): 61-69

[26] 司雪阳,王浩,郭晓青,等.亚麻籽饲粮中添加不同水平酵母硒对蛋鸡肝脏抗氧化能力、蛋黄脂肪酸组成和蛋中硒含量的影响[J].动物营养学报,2020,32(5):2138-2147
SI Xue-yang, WANG Hao, GUO Xiao-qing, et al. Effects of different supplement levels of yeast selenium in flaxseed diets on liver antioxidant capacity, yolk fatty acid composition and egg selenium content of laying hens [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(5): 2138-2147

[27] 何柳青,曲湘勇,魏艳红,等.茶多酚和酵母硒及其互作对绿壳蛋鸡生产性能、蛋品质及蛋黄中胆固醇和硒含量的影响[J].动物营养学报,2012,24(10):1966-1975
HE Liu-qing, QU Xiang- yong, WEI Yan- hong, et al. Effects of tea polyphenols and selenium yeast and their interaction on

performance, egg quality and contents of cholesterol and selenium in yolk of green shell hens [J].Chinese Journal of Animal Nutrition, 2012, 24(10): 1966-1975

[28] 杨玉,孙煜,孙宝盛,等.酵母硒对产蛋后期蛋鸡生产性能、蛋品质、抗氧化与脂代谢及其相关基因表达的影响[J].动物营养学报,2018,30(11):4397-4407
YANG Yu, SUN Yu, SUN Bao-sheng, et al. Effects of selenium yeast supplementation on performance, egg quality, Antioxidant and lipid metabolism and their related gene expression of laying hens at late laying period [J].Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(11): 4397-4407

[29] 龙门,宋野,杜庆飞,等.腌制温度和食盐用量对咸鸭蛋蛋黄脂质的影响[J].农业工程学报,2015,31(18):281-288
LONG Men, SONG Ye, DU Qing-fei, et al. Effect of pickling temperature and concentration of salt solution on lipid of duck egg yolk [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(18): 281-288

[30] 谢绿绿,马美湖,皮劲松,等.6 个品种鸡蛋黄中脂肪酸营养成分分析[J].营养学报,2011,33(5):534-536
XIE Lyu-lyu, MA Mei-hu, PI Jin-song, et al. Analysis of fatty acid composition of different varieties of egg yolk [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2011, 33(5): 534-536

[31] 曾舟,马美湖,何兰,等.不同腌制添加剂对咸蛋腌制效果的影响[J].中国食品学报,2012,12(10):140-148
ZENG Zhou, MA Mei-hu, HE-lan, et al. Effects of different curing additives on the curing effect of salted eggs [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(10): 140-148

[32] 冯月超,刘美玉,任发政.热处理对鸡蛋黄挥发性风味的影响[J].肉类研究,2006,10:31-33
FENG Yue-chao, LIU Mei-yue, REN Fa-zheng. Effects of heat treatment on volatile falvour components of egg yolk [J]. Meat Research, 2006, 10: 31-33

[33] 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

（上接第 163 页）

[21] HAN Zhong, ZENG Xin-an, ZHANG Ben-shan, et al. Effects of pulsed electric fields (PEF) treatment on the properties of corn starch [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(3): 318-323

[22] WU Chun-sen, WU Qiu-Yan, WU Man-gang, et al. Effect of pulsed electric field on properties and multi-scale structure of japonica rice starch [J]. LWT, 2019, 116: 108515

[23] Dura Angela, Rosell Cristina M. Physico-chemical properties of corn starch modified with cyclodextrin glycosyltransferase [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 87: 466-472

[24] Fredriksson H, Silverio J, Andersson R, et al. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches [J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 35(3-4): 119-134

[25] 胡芬,曾新安,韩忠,等.脉冲电场处理对玉米淀粉结构特征和消化性的影响[J].食品工业科技,2012,33(24):142-146
HU Fen, ZENG Xin-an, HAN Zhong, et al. Effects of pulse electric field treatment on the structure and digestibility of corn starch [J]. Food Industry Technology, 2012, 33(24): 142-146

[26] Maache-Rezzoug Z, Maugard T, Zarguili I, et al. Effect of instantaneous controlled pressure drop (DIC) on physicochemical properties of wheat, waxy and standard maize starches [J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(3): 346-353

[27] Benavent-Gil Yaiza, Rosell Cristina M. Morphological and physicochemical characterization of porous starches obtained from different botanical sources and amylolytic enzymes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 103: 587-595

[28] OATES Christopher G. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis [J]. Trends in Food Science & Technology, 1997, 8(11): 375-382

[29] Kim J C, Kong B W, Kim M J, et al. Amylolytic hydrolysis of native starch granules affected by granule surface area [J]. Pubmed, 2008, 73(9): 621-624

[30] ZHU Jian-zhong, ZHONG Li, CHEN Wen-xue, et al. Preparation and characterization of pectin/chitosan beads containing porous starch embedded with doxorubicin hydrochloride: a novel and simple colon targeted drug delivery system [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 562-570

[31] Lisa Vaccari, Davide Canton, Nadia Zaffaroni, et al. Porous silicon as drug carrier for controlled delivery of doxorubicin anticancer agent [J]. Elsevier B V, 2006, 83(4-9): 1598-1601