

4 种鸡蛋制品的体外消化特性及对肠道菌群的影响

崔保宇, 卢海强, 王玉印, 田洪涛, 谷新晰*
(河北农业大学食品科技学院 河北保定 071001)

摘要 目的:评估白煮蛋、卤蛋、茶叶蛋和臭鸡蛋的老年人体外消化特性及其对肠道菌群的影响。方法:构建 3 种老年体外消化模型[口腔(E_1)、口腔和胃(E_2)、口腔和胃肠道(E_3)],以健康成人模型(C)为对照进行探究。结果表明:4 种鸡蛋制品的蛋白质含量为 11.84%~13.40%,脂肪含量为 7.79%~16.15%,水分含量为 68.50%~76.11%,其中臭鸡蛋的蛋白含量最低(约 11.84%),脂肪含量最高(约 16.15%)。体外消化模拟结果表明,老年人消化过程中臭鸡蛋的蛋白质消化率最低(约 47%),而其它 3 种鸡蛋制品的蛋白消化率基本一致(约 70%)。此外,本研究还发现 E_2 消化模型并未引起蛋白质消化率降低,而 E_3 消化模型却对鸡蛋蛋白的消化有较大影响,约降低了 12%~21%。进一步分析发现,臭鸡蛋组功能氨基酸的相对含量均高于其它 3 组,表现出较强的生物活性。4 种鸡蛋制品引起老年人肠道菌群结构的改变,样品组微生物共发现 56 个属,其中双歧杆菌属的相对丰度最高。卤蛋组、臭鸡蛋组、白煮蛋组和茶叶蛋组中双歧杆菌属的相对丰度分别为 51.44%,47.75%,47.56%和 44.05%,且 4 种鸡蛋制品的 B/E 值分别是 1.27,1.12,1.09,0.92,表明卤蛋和臭鸡蛋具有较好地改善肠道菌群结构的能力。4 种鸡蛋制品对肠道中不同短链脂肪酸含量的影响存在较大差异,其中臭鸡蛋组的丙酸和丁酸释放量影响最大,分别为 1.12 mmol/L 和 0.38 mmol/L。

关键词 鸡蛋;老年人;体外消化模拟;肠道菌群;短链脂肪酸

文章编号 1009-7848(2025)02-0169-10 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2025.02.015

2020 年我国 60 岁及以上人口为 26 402 万人,约占总人口的 18.70%,这表明我国已进入老龄化社会^[1]。同时,随着年龄的增长,老年人的口腔及胃肠道逐渐老化,饮食困难的问题日益凸显,严重影响了老年人群身心健康^[2]。鸡蛋因其低成本、宜咀嚼以及富含蛋白质和维生素 A 成为老年人每周补充营养的推荐饮食^[3]。在我国,鸡蛋通常经过不同的加工后食用,这些加工方式中有些极具地域特色,如咸蛋、皮蛋和臭鸡蛋^[4]等。不同加工方式会造成鸡蛋中的蛋白质结构发生改变,往往影响其消化率^[5]。目前大多数蛋制品的消化研究是基于青年人消化模型^[6]进行的,而关于蛋制品在老年人消化特征方面的研究较少,尤其是有关传统发酵食品——臭鸡蛋对老年人的消化特性的影响更是鲜有报道。

食物中的营养物质经胃和小肠消化吸收后,仍有一定数量的营养物质进入大肠,并影响肠道

微生物菌群结构及丰度^[7]。肠道菌群被称为人类的“第二基因组”,是人体最复杂的微生态系统,其重要性已得到广泛认可^[8]。不同蛋白质对肠道菌群的影响存在差异,如:Butteiger 等^[9]在研究大豆蛋白与牛奶蛋白对仓鼠肠道菌群的影响时,发现两种蛋白会改变仓鼠肠道菌群结构及丰度,并且肠道菌群的代谢模式也存在明显差异。Liang 等^[10]也发现小麦蛋白可显著改变地鼠肠道微生物的结构。然而,到目前为止,鸡蛋蛋白对人肠道微生物的影响未见报道。

本研究以白煮蛋、卤蛋、茶叶蛋和臭鸡蛋 4 种鸡蛋制品为试验材料,评估其在口腔老化模型、胃部老化模型以及肠道老化模型中的消化特征,探究不同鸡蛋制品对老年人肠道菌群结构的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜鸡蛋购于保定市某超市,于室温下保存;胃蛋白酶、胰酶、猪胆盐,美国 Sigma 公司;氯化钠、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾等,天津市福晨化学试剂厂;半胱氨酸、氯化血红素,上海麦克林试剂有限公司;刃天青、酪蛋白,上海源叶试剂有限公司。

收稿日期:2024-02-11

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31901631)

第一作者:崔保宇,男,硕士

通信作者:谷新晰 E-mail: helloguxinxi@163.com

1.2 仪器与设备

电子分析天平, 奥斯豪仪器(上海)有限公司; 全自动凯氏定氮仪, 丹麦福斯分析仪器有限公司; 索氏提取器; 马弗炉; 氨基酸自动分析仪, 日本日立高新技术公司; GC2014 气质谱仪, 日本岛津公司; 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; 高速冷冻离心机, 德国 Hettich Universal 公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的制备 白煮蛋参照段云霞等^[11]的方法制作; 卤蛋参照刘静波等^[12]的方法制作; 茶叶蛋参照魏明英等^[13]的方法制作; 臭鸡蛋参照谷新晰等^[14]的方法制作, 具体操作为: 将生鸡蛋煮制 10 min, 结束后剔除煮制过程中蛋壳破裂的鸡蛋; 以 0.1% 花椒、八角、桂皮和香叶等调料, 4% 食盐煮制卤汤, 煮制时间为 20 min, 将挑选后的鸡蛋加入卤汤并加入到清洗后晾干的发酵容器内, 接种 1% 实

实验室保存的、发酵 60 d 的“臭鸡蛋”卤汤, 室温密闭发酵 35 d。

1.3.2 鸡蛋制品的营养组分评价 采用冷冻干燥法^[15]测定 4 种鸡蛋制品中的水分含量; 参照《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB/T 5009.5-2016) 中的方法测定蛋白质含量; 参照《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》(GB/T 5009.6-2016) 中的方法测定脂肪含量; 参照《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(GB/T 5009.4-2016) 中的方法测定灰分含量。

1.3.3 4 种鸡蛋制品的老年人消化特性评价

1.3.3.1 老年人消化模型的构建 老年人消化模型的构建参照 Levi 等^[16]的方法, 口腔老化模型 (E₁)、口腔和胃部老化模型 (E₂) 和口腔、胃、肠老化模型 (E₃)。对照组青年消化模型 (C) 参照 Minekus 等^[17]的方法构建。4 种消化模型具体参数见表 1。

表 1 4 种消化模型的构建

Table 1 Construction of four digestive models

类别	咀嚼次数	胃相消化	肠相消化
C	16	pH 3 胃蛋白酶(2 000 U/mL) 2 h	pH 6 胆酸(10 mmol/L) 胰蛋白酶(1 500 U/mL) 2 h
E1	8	pH 3 胃蛋白酶(2 000 U/mL) 2 h	pH 6 胆酸(10 mmol/L) 胰蛋白酶(1 500 U/mL) 2 h
E2	8	pH 5 胃蛋白酶(1 500 U/mL) 2 h	pH 6 胆酸(10 mmol/L) 胰蛋白酶(1 500 U/mL) 2 h
E3	8	pH 5 胃蛋白酶(1 500 U/mL) 2 h	pH 7 胆酸(5 mmol/L) 胰蛋白酶(50 U/mL) 4 h

体外消化的具体操作根据 Olivas 等^[15]的方法并稍作修改: 按照质量比 7:3 的比例称取蛋白和蛋黄, 口腔消化阶段在健康青年的口腔中进行模拟, 之后分别按照各模型参数进行操作。结束后将经过胃、肠消化的食糜 pH 值调至 5.0, 置于冰水中 10 min 来抑制酶活, 之后在 4 ℃、12 000 r/min 的条件下离心 20 min, 取上清液冻存于 -80 ℃, 保存备用。

1.3.3.2 蛋白质消化率的测定 依据 Yao 等^[18]的测定方法测定蛋白质消化率。采用 0.01 mol/L 盐酸超声处理 5 min 后, 离心(4 000/min, 10 min)收集, 用氨基酸分析仪检测游离氨基酸含量, 参照式(1)计算蛋白消化率。

蛋白消化率(%) = 消化液中游离氨基酸质量/消化前蛋白质量 × 100 (1)

依据游离氨基酸测定结果^[19], 分析必需氨基酸(EAA)和非必需氨基酸(NEAA)、疏水性氨基酸(HAA, 包含 Ala、Val、Ile、Leu、Tyr、Phe、Trp、Pro、Met、Cys)、带正电荷的氨基酸(PCAA, 包含 Lys、His)、带负电荷的氨基酸(NCAA, 包含 Asp、Asn、Glu、Gln)、芳香族氨基酸(AAA, 包含 Phe、Trp、Tyr)和含硫氨基酸(SCAA, 包含 Cys、Met)含量, 全面探究不同鸡蛋制品的蛋白消化特性。

1.3.4 4 种鸡蛋制品对老年人肠道菌群的影响

1.3.4.1 老年肠道菌悬液的制备 取健康老年人的粪便 1.0 g, 将其加入到 10 mL 经过滤、脱氧处理

的 PBS 缓冲液(pH 7.3)中,振荡混匀,将混匀后的浊液经无菌纱布过滤至 90 mL 的 PBS 缓冲液中,即为菌悬液,置于 4 ℃冰箱备用。

1.3.4.2 胃肠道消化的静态体外模拟 取菌悬液加入肠道菌群培养基,并各加入 1 mL 鸡蛋样品的消化液,其添加比例为 $V_{\text{培养基}}:V_{\text{菌悬液}}:V_{\text{消化液}}=7:2:1$ 。以添加酪蛋白体外消化液记为对照组(CK)。

肠道菌群培养基方法配制^[20]如下:取 10.0 g 葡萄糖,2.0 g 蛋白胨,2.0 g 酵母浸粉,0.1 g NaCl,0.04 g K_2HPO_4 ,0.01 g KH_2PO_4 ,0.01 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$,0.01 g $CaCl_2 \cdot 6H_2O$,2.0 g $NaHCO_3$,0.5 g 半胱氨酸,0.02 g 氯化血红素,0.5 g 猪胆盐,2 mL 吐温 80,10 μL 维生素 K_1 ,1 g 刃天青,定容 1 L。将其分装至厌氧菌培养螺口管中,通入氮气使培养基颜色由紫色变为浅黄色,121 ℃灭菌 15 min。

1.3.4.3 短链脂肪酸的变化规律 分别在 0,6,12,18,24 h 取样,测定其 pH 值及短链脂肪酸含量。采用台式 pH 计测定培养液的 pH 值。短链脂肪酸含量测定方法^[21]如下:取上述培养液 1 mL,加入 0.2 mL 含有内标 2-乙基丁酸(2-EB)的 0.25% 偏磷酸铵溶液,充分混匀,冰浴 30 min,10 000 r/min 离心 10 min,去除样品中的蛋白沉淀物后,使用气质谱仪测定其上清液中的短链脂肪酸含量。

1.3.4.4 肠道微生物菌群的变化规律 测定发酵样品的微生物菌群结构和丰富度,探究 4 种鸡蛋制品对老年人肠道菌群的影响。菌群结构分析采用 16S rRNA 基因高通量测序,具体方法^[22]为:提取样本 DNA 后,对 16S rRNA 基因 V3-V4 区域进行 PCR 扩增、文库制备、文库质检、定量,采用 Illumina Hiseq 2500 高通量测序平台进行测序。数据分析运用 QIIME 2 软件和 R 语言 ggplot 2

包进行物种水平上组成成分分析和可视化,进行 Alpha 多样性分析。

1.3.5 数据分析 试验进行 3 次重复,结果以平均值 \pm 标准误差表示;采用 SPSS 23.0 软件进行数据分析, $P<0.05$ 则认为差异显著;采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件作图。

2 结果与分析

2.1 4 种鸡蛋制品的营养组分差异分析

不同鸡蛋制品的营养组分结果如表 2 所示。结果表明,加工方式对鸡蛋的营养组分含量有一定的影响。白煮蛋的蛋白含量最高(13.40%),其次是卤蛋和茶叶蛋(约 12.24%~12.49%),而臭鸡蛋的蛋白含量最低。鸡蛋制品中的脂肪含量表现出相反的结论,臭鸡蛋的脂肪含量最高(16.15%),卤蛋和白煮蛋的含量居中,分别为 9.69%和 8.21%,茶叶蛋的脂肪相对含量最低。4 种鸡蛋制品的水分含量随着加工时间的延长而降低,臭鸡蛋的水分含量最低,为 68.50%,较白煮蛋低 8%左右。灰分主要是一些盐类物质,鸡蛋经卤制(卤蛋和茶叶蛋)或发酵(臭鸡蛋)后灰分含量明显增加,由原来的 0.80%增加至 1.26%,1.43%和 1.45%。总体而言,臭鸡蛋与其它 3 种鸡蛋制品的差异较大,这可能与臭鸡蛋经历了发酵过程有关。在发酵过程中蛋白质会被分解为小肽或氨基酸,而导致含量的降低,并且臭鸡蛋中脂肪含量最高,这也说明臭鸡蛋在发酵过程中部分蛋白质、碳水化合物等物质被微生物所利用得到转化,从而导致了脂肪含量的升高,类似的情况在 Yafetto 等^[23]的研究中也得到证实;白煮蛋、卤蛋和茶叶蛋的水分含量相近,臭鸡蛋的水分含量较低,这说明在发酵过程中臭鸡蛋的结构可能变得更加紧密,导致含水量降低。

表 2 4 种鸡蛋制品的营养组分比较

Table 2 Comparison of nutritional components of four kinds of egg products

类别	蛋白质含量/%	脂肪含量/%	水分含量/%	灰分含量/%
白煮蛋	13.40 \pm 0.53 ^a	8.21 \pm 0.33 ^c	76.11 \pm 0.91 ^a	0.80 \pm 0.14 ^d
卤蛋	12.24 \pm 0.17 ^b	9.69 \pm 0.83 ^b	74.44 \pm 1.98 ^a	1.26 \pm 0.01 ^b
茶叶蛋	12.49 \pm 0.10 ^b	7.79 \pm 0.50 ^d	74.24 \pm 0.05 ^a	1.43 \pm 0.17 ^a
臭鸡蛋	11.84 \pm 0.07 ^c	16.15 \pm 0.97 ^a	68.50 \pm 1.61 ^b	1.45 \pm 0.13 ^c

注:相同指标的肩标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 4种鸡蛋制品的蛋白质消化分析

不同鸡蛋制品的加工方式会导致鸡蛋的基质结构、物理特性、感官质量和成分组成不同,因而蛋白质消化率存在一定的差异^[24]。本研究发现,白煮蛋、卤蛋及茶叶蛋在4种老年人消化模型中的蛋白质消化率基本一致,而臭鸡蛋则表现出明显的差异,其蛋白质消化率相对较低。前期研究中发现^[4],作为发酵食品的臭鸡蛋同其它发酵食品一样,在发酵的过程中大量的大分子物质(蛋白质)已被降解成了小分子(小肽或氨基酸),这很可能是造成臭鸡蛋蛋白消耗率值偏低的原因。除此以外,研究还发现白煮蛋、卤蛋、茶叶蛋和臭鸡蛋在老年人消化模型的变化规律相一致,即口腔和胃的老化并未引起蛋白质消化率的降低,而肠道老化却显著降低了蛋白质消化率,其分别降低了21.84%,21.19%,21.44%和12.00%。

进一步分析得到,臭鸡蛋组 EAA/NEAA 的比率最高可达 1.23,而白煮蛋组的仅为 0.54。图 2a 中臭鸡蛋组的 EAA/NEAA 的比值明显高于其它 3 组样品,这是因为臭鸡蛋在发酵生产过程中就已经产生了比较多的 EAA,这也解释了臭鸡蛋组在 4 种消化模型中蛋白质消化率都较低的原因。EAA 与 NEAA 的释放是由于胰酶对某些肽键的专一性所致^[25],这也在侧面证明臭鸡蛋在发酵过程会产生某些功能肽,促进 EAA 的释放。EAA 高度参与肌肉蛋白质的合成^[26],因此对于想获得更多 EAA 的特定人群来讲,臭鸡蛋要优于白煮蛋、卤蛋和茶叶蛋。

疏水性氨基酸(HAA)中 Val、Ile、Leu 可以调控许多关键信号通路,其中最经典的是 mTOR 信号通路的激活,这一信号通路连接许多不同的生理和代谢作用,其在调节动物的能量稳态、营养代谢、肠道健康、免疫和疾病等方面也发挥着重要作用^[27]。由图 2b 得知 4 种鸡蛋制品中茶叶蛋组的 HAA 相对含量均较高,这很可能与其含有茶多酚有关。已有研究^[28]证明茶多酚可以阻碍甲硫氨酸和色氨酸等与自由基相结合,缓解蛋白质氧化,且与蛋白质相结合后,可以改变其结构,使其更易于被胃蛋白酶和胰蛋白酶等消化酶水解,提高蛋白质消化率^[29],这也与蛋白质消化率中茶叶蛋组略高于其它 3 组相符合。另外通过 4 种消化模型对

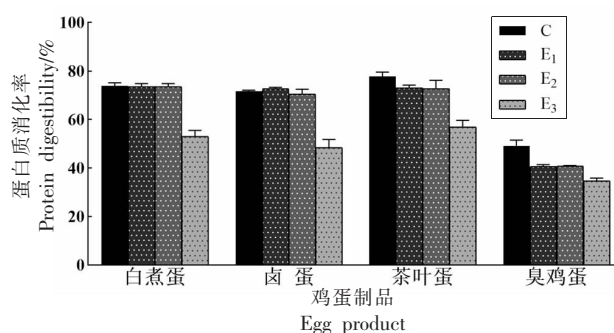


图 1 4种鸡蛋制品在不同消化模型中的蛋白质消化率
Fig.1 Protein digestibility of four kinds of egg products in different digestion models

比发现,消化系统的老化不仅未影响鸡蛋 HAA 的释放,反而表现出更加积极的作用。

带正电荷的氨基酸(PCAA)中 His 和 Lys 可以改善多肽的抗氧化性^[25]。部分 PCAA 参与线粒体某些基因的上调,可以增加胰岛素敏感组织中长链脂肪酸和葡萄糖氧化,饮食中补充带负电荷的氨基酸(NCAA)也可以促进氧化防御和免疫功能^[30]。图 2c 和 2d 显示白煮蛋和臭鸡蛋组并未受到消化系统老化的影响,其 PCAA 和 NCAA 相对含量均较高,而卤蛋和茶叶蛋则受影响较大。

芳香族氨基酸(AAA)是合成单胺递质(包括儿茶酚氨类和 5-羟色胺)的前体,5-羟色胺有拮抗乙酰胆碱的作用,剧烈运动时脑组织中 AAA 含量升高,将会更有利于缓解老年痴呆^[31]。白煮蛋、卤蛋和臭鸡蛋组的 AAA 相对含量在 E₃ 模型下达到最高,且臭鸡蛋 E₃ 模型的 AAA 相对含量最高。茶叶蛋组分别经 E₁、E₂、E₃ 消化模型后 AAA 相对含量逐渐降低,这可能与肠道菌群促进茶多酚代谢形成苯基- γ -戊内酯和苯戊酸有关,而这些代谢产物会抑制微生物代谢形成芳香族氨基酸及其代谢产物^[32],导致 AAA 相对含量降低。

含硫氨基酸(SCAA)作为动物体内重要的功能性氨基酸,具有促进营养物质在肠道消化吸收,维持肠道正常形态结构等功能,而且其作为抗氧化剂对自由基具有防御作用,内部天然存在的含硫配体也是有效和安全的解毒剂^[33]。臭鸡蛋组的 SCAA 相对含量在 4 种消化模型均最低,这种现象是很可能与臭鸡蛋在发酵过程中消耗了更多的含硫氨基酸或者可以分解含硫氨基酸的蛋白质有关^[34]。

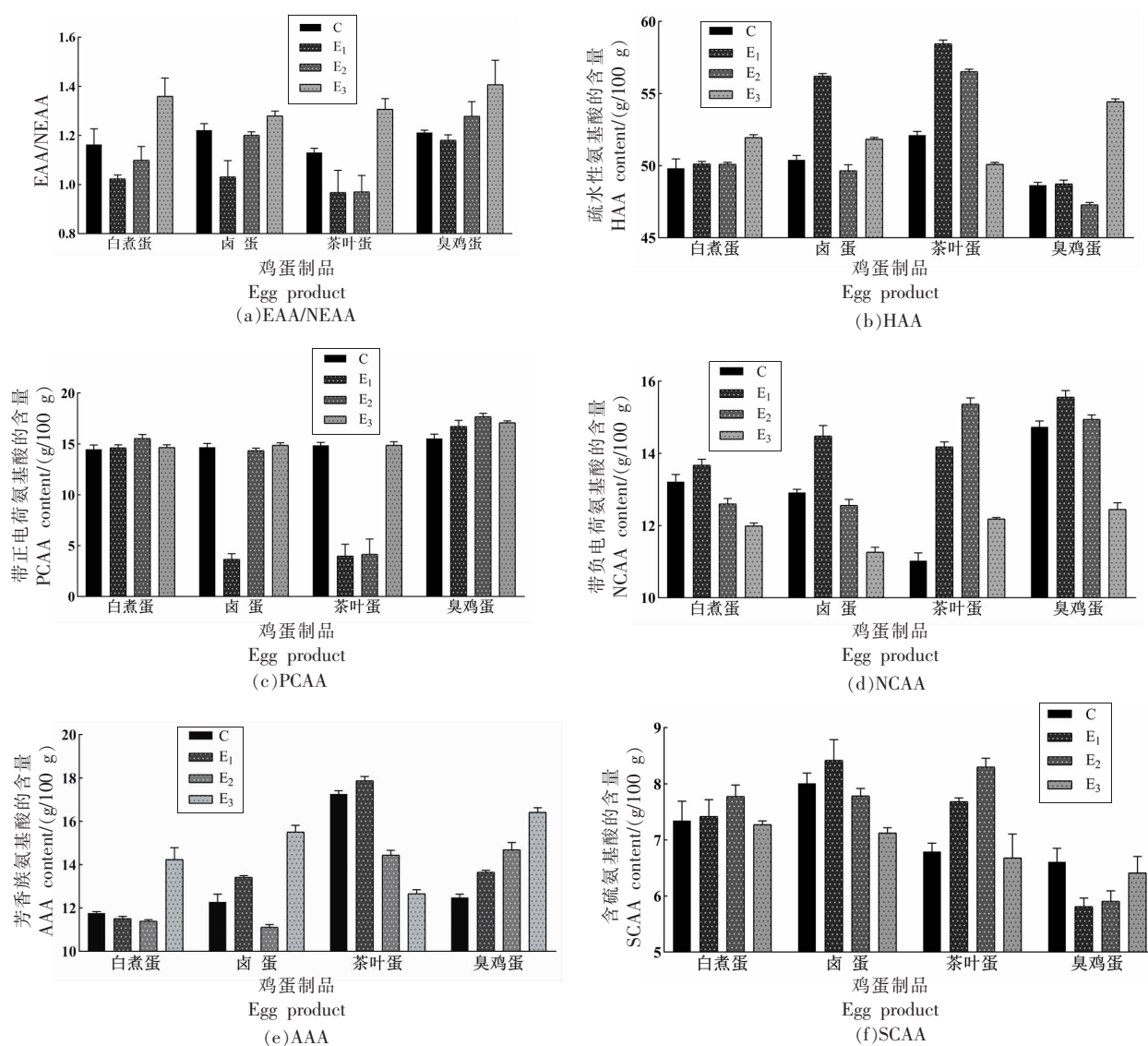


图2 4种鸡蛋制品在不同消化模型中的蛋白水解程度

Fig.2 Protein hydrolysis degree of four kinds of egg products in different digestion models

2.3 老年人肠道菌群体外培养分析

2.3.1 肠道微生物的属水平分析 4种鸡蛋制品对老年人肠道菌群微生物的影响结果如图3所示,不同样品对微生物群落丰度影响有所不同。属水平进行分析(图3a),高蛋白食物会引起肠道菌群结构的改变,空白对照组的肠道微生物共有88种,而4类样品组共56种,其中双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)、志贺属(*Escherichia-Shigella*)、严格梭菌属(*Clostridium_sensu_stricto*)、肠杆菌属(*Enterobacteriaceae*)、拟杆菌属(*Bacteroides*)为优势菌属,且双歧杆菌属的相对丰度最高。卤蛋组中双歧杆菌属相对丰度为51.44%,臭鸡蛋组和白煮蛋组

中双歧杆菌属的相对丰度相近,分别为47.75%和47.56%,茶叶蛋组为44.05%,由此可知,鸡蛋制品有利于肠道中双歧杆菌属微生物的生长。另外4种鸡蛋样品组中的志贺属相对丰度要低于CK组,其中以卤蛋组和臭鸡蛋组中志贺属的相对丰度最低,分别为39.81%和42.73%,此结果说明卤蛋和臭鸡蛋会抑制肠道中志贺氏菌的生长。

Sandberg等^[35]指出普雷沃氏菌属/拟杆菌属的高比值或有利于机体的代谢,而在本试验中白煮蛋,茶叶蛋和CK组中均未检出普雷沃氏菌属,臭鸡蛋组普雷沃氏菌属/拟杆菌属的比值高于卤蛋。结果表明,食用臭鸡蛋相比白煮蛋、卤蛋和茶叶蛋

能够调节普雷沃氏菌属/拟杆菌属的比值,进而提高机体代谢能力。

图 3b 进一步描述了不同鸡蛋制品对肠道菌群组成的影响,白煮蛋组肠道菌群数目为 40 个,卤蛋组菌属数目为 32 个,茶叶蛋组菌属数目为 25 个,臭鸡蛋组菌属数目为 36 个,CK 组菌属数目为 35 个。其中共有菌属数目为 17 个,包括志贺属、梭杆菌属 (*Fusicatenibacter*) 和柯林斯菌属 (*Collinsella*) 等。另外白煮蛋组特有的菌属数目为 7 个,分别有寡养单胞菌属 (*Stenotrophomonas*)、短状杆菌属 (*Brachybacterium*) 和戈登氏杆菌属 (*Gor-*

donibacter) 等;卤蛋组独有的菌属数目为 3 个,包含栖粪杆菌属 (*Faecalibacterium*)、亮杆菌属 (*Leucobacter*) 等;臭鸡蛋组特有的菌属数目为 3 个,包括毛螺菌属 (*Lachnospiraceae*)、颤螺菌属 (*Oscillospiraceae*) 和粪杆菌属 (*Coprobacillus*);茶叶蛋组则没有特有的菌属。由此可见白煮蛋和臭鸡蛋组的菌属总数目略有提高,独有的菌属数目也较高,这说明进食白煮蛋和臭鸡蛋可在一定程度上提高肠道菌群的丰富度,而且臭鸡蛋组独有的菌属全部为有益菌,对人体健康具有一定的益处。

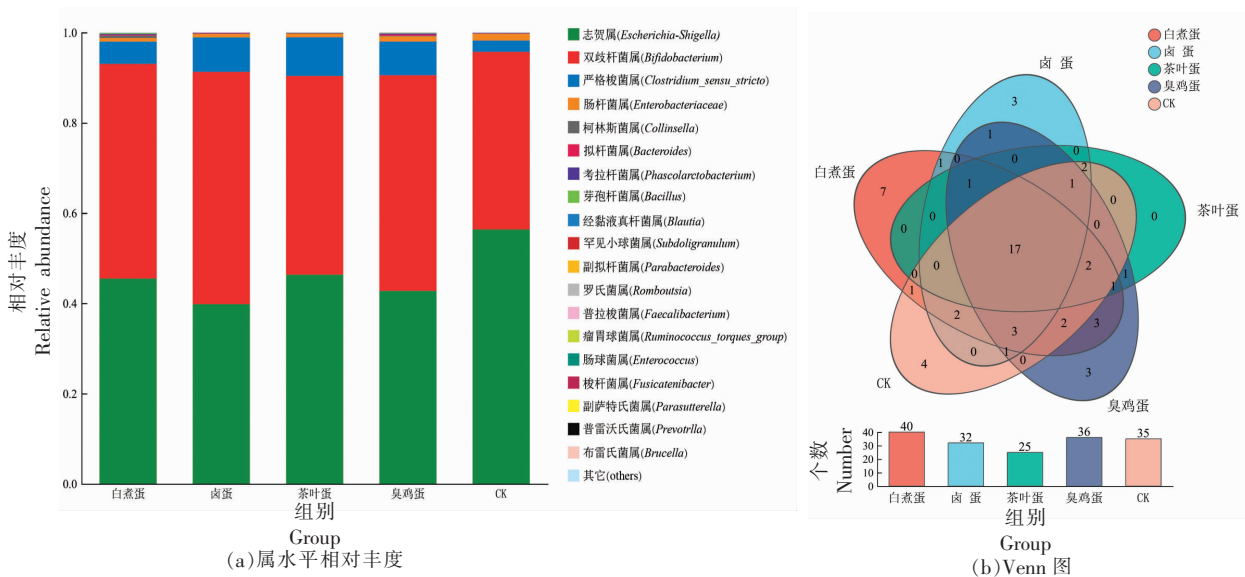


图 3 不同鸡蛋制品对老年人肠道微生物多样性的影响

Fig.3 The impact of different egg products on the diversity of gut microbiota in elderly people

2.3.2 *B/E* 值变化 肠道中双歧杆菌和肠杆菌的数量之比 (*B/E*) 常作为肠道菌群定制抗力的指标,以此反映肠道菌群结构,其中 *B/E* > 1 表示肠道菌群结构正常、*B/E* < 1 表示菌群结构失调^[36]。由图 4 可知,白煮蛋、卤蛋、茶叶蛋、臭鸡蛋和 CK 组的 *B/E* 值分别是 1.09, 1.27, 0.92, 1.12, 0.67。可看出各样品的比值均比 CK 组高,且除茶叶蛋外的 *B/E* 值都高于 1.0,这说明鸡蛋制品有利于调节肠道菌群结构以及有助于肠道益生菌定植。卤蛋效果最好、臭鸡蛋次之,茶叶蛋效果最差,表明卤蛋和臭鸡蛋具有较好的改善肠道菌群结构的能力。

2.3.3 老年人肠道菌群体外培养中短链脂肪酸含量分析 如图 5a 所示,各组的总短链脂肪酸含量随着发酵的进行逐步增加,直至 12 h,短链脂肪酸

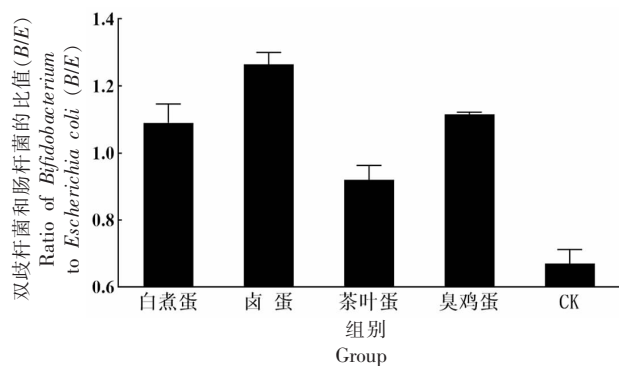


图 4 不同鸡蛋制品对老年人肠道微生物 *B/E* 值的影响

Effects of different egg products on the *B/E* values of intestinal microorganisms in the elderly 含量变化总体不再显著。这与各组的 pH 值含量变化相一致,在前 12 h 逐渐下降,之后基本维持不变,表明 pH 值可从一定程度上可以反映短链

脂肪酸的产生情况,类似的现象也被方芳等^[37]报道。进一步研究发现,4 种鸡蛋制品对老年人肠道菌群中的短链脂肪酸含量存在较大影响。臭鸡蛋组对肠道中丙酸和丁酸的释放量影响最大,分别为 1.12 mmol/L 和 0.38 mmol/L,这很可能与臭鸡蛋组能够促进普拉梭菌和考拉杆菌的增值有关,普拉梭菌是重要的丁酸产生菌,考拉杆菌也可

代谢产生乙酸盐和丙酸盐^[38]。据报道^[39],乙酸能被大脑及心脏外围组织氧化利用为机体提供能力按来源;丙酸可抑制内源性胆固醇的合成;丁酸能够促进肌体细胞分泌胰岛素,具有一定降血糖作用。这也说明臭鸡蛋具有较强的生物活性潜力,对机体有一定的益处。

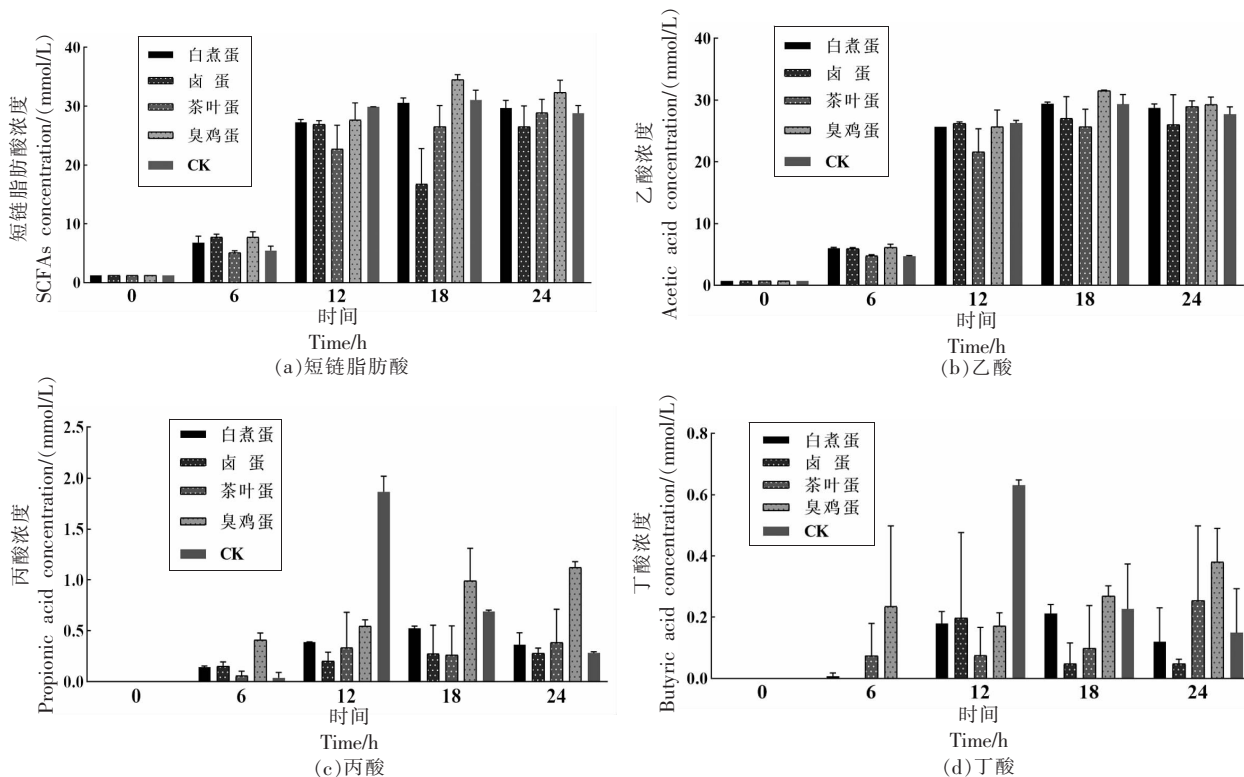


图 5 老年人肠道菌群中的短链脂肪酸含量分析

Fig.5 Analysis of short chain fatty acid content in the gut microbiota of elderly people

3 结论

本研究对白煮蛋、卤蛋、茶叶蛋和臭鸡蛋的营养组成成分,并通过构建体外消化模型对其消化特性进行分析,包括蛋白质消化率、肠道菌群结构变化情况以及短链脂肪酸的释放量。营养组成方面发现加工方式会对其产生一定的影响,4 种鸡蛋制品的蛋白质含量为 11.84%~13.40%,脂肪含量为 7.79%~16.15%,水分含量为 68.50%~76.11%,其中白煮蛋的蛋白质含量最高,臭鸡蛋的最低,脂肪含量中则表现为相反的结论。体外模拟消化方面,白煮蛋、卤蛋和茶叶蛋经老年人消化模型后蛋白质消化率相近约为 70%,臭鸡蛋的消化率最低约 47%。另外研究发现口腔和胃的老化不会引起

蛋白质消化率的显著下降,而肠道老化则会对其产生较大影响。白煮蛋、卤蛋、茶叶蛋和臭鸡蛋组经 E₃ 消化模型后蛋白质消化率分别降低 21.84%, 21.19%, 21.44% 和 12.00%。依据游离氨基酸结果进一步分析发现,臭鸡蛋组的功能性氨基酸相对含量均高于其它 3 组,表明其在调节机体营养代谢和肠道健康方面具有积极意义。肠道菌群方面,4 种鸡蛋制品组的菌属数目共为 56 种,相对于对照组发现高蛋白食物会引起肠道菌群结构的改变,其中双歧杆菌的相对丰度最高。卤蛋组、臭鸡蛋组、白煮蛋组和茶叶蛋组中双歧杆菌属的相对丰度分别为 51.44%, 47.75%, 47.56% 和 44.05%,且 4 种鸡蛋制品的 B/E 值分别是 1.27, 1.12,

1.09,0.92,表明卤蛋和臭鸡蛋有利于益生菌的定植、增殖,具有较好地改善肠道菌群结构的能力。短链脂肪酸方面,4种鸡蛋制品对其的释放量表现出较大的差异,其中臭鸡蛋组对肠道中丙酸和丁酸的释放量影响最大,分别为1.12 mmol/L和0.38 mmol/L。以上研究结果可为老年人选择合适的鸡蛋制品以及进一步研究提供一定的理论支撑。

参 考 文 献

- [1] 董梦晗,王旭莲,刘倩,等.老年特殊食品的研究现状与设计策略[J].中国食品学报,2023,23(12):349-361.
DONG M H, WANG X L, LIU Q, et al. Research status and design strategies of special foods for the elderly[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 349-361
- [2] PRINCE M J, WU F, GUO Y, et al. The burden of disease in older people and implications for health policy and practice[J]. The Lancet, 2015, 385(9967): 549-562.
- [3] GODBERT S, GUYOT N, NYS Y. The golden egg: Nutritional value, bioactivities, and emerging benefits for human health[J]. Nutrients, 2019, 11(3): 684.
- [4] 陈伟,李杨,谷新晰,等.腌制臭鸡蛋中微生物多样性分析及关键物质含量测定[J].食品科学,2020,41(22):158-165.
CHEN W, LI Y, GU X X, et al. Microbial diversity analysis and determination of key substance content in pickled rotten eggs [J]. Food Science, 2020, 41(22): 158-165.
- [5] OLIVAS H, PINA S, ANA A, et al. Impact of cooking preparation on *in vitro* digestion of eggs simulating some gastrointestinal alterations in elders [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(15): 4402-4411.
- [6] 顾璐萍,范巧,李俊华,等.热处理方式对虾青素强化鸡蛋消化特性的影响[J].食品工业科技,2022,43(23):112-118.
GU L P, FAN Q, LI J H, et al. The effect of heat treatment methods on the digestion characteristics of astaxanthin fortified eggs [J]. Food Industry Technology, 2022, 43(23): 112-118.
- [7] BARRATT M J, LEBRILLA C, SHAPIRO H Y, et al. The gut microbiota, food science, and human nutrition: A timely marriage[J]. Cell Host & Microbe, 2017, 22(2): 134-141.
- [8] QUAN Y, ZHANG K X, ZHANG H Y. The gut microbiota links disease to human genome evolution [J]. Trends in Genetics, 2023, 39(6): 451-461.
- [9] BUTTEIGER D N, HIBBERD A A, MCGRAW N J, et al. Soy protein compared with milk protein in a western diet increases gut microbial diversity and reduces serum lipids in golden syrian hamsters [J]. Journal of Nutrition, 2016, 146(4): 697.
- [10] LIANG T T, TONG L T, GENG D H, et al. Wheat gluten regulates cholesterol metabolism by modulating gut microbiota in hamsters with hyperlipidemia[J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(9): 909-922.
- [11] 段云霞,赵英,迟玉杰.基于低场核磁共振技术分析不同贮藏条件下白煮蛋水分分布及品质变化[J].食品科学,2018,39(9):26-32.
DUAN Y X, ZHAO Y, CHI Y J. Analysis of water distribution and quality changes of boiled eggs under different storage conditions based on low field nuclear magnetic resonance technology [J]. Food Science, 2018, 39(9): 26-32.
- [12] 刘静波,程懂坤,赵颂宁,等.预煮方式对卤蛋加工过程中理化性质的影响[J].肉类工业,2021,482(6):25-30.
LIU J B, CHENG D K, ZHAO S N, et al. The influence of pre-cooking method on the physical and chemical properties of soy egg during processing[J]. Meat Industry, 2021, 482(6): 25-30.
- [13] 魏明英,胡太健.茶叶鸡蛋干的研制[J].食品研究与开发,2015,36(19):89-92.
WEI M Y, HU T J. Development of tea dried eggs [J]. Food Research and Development, 2015, 36(19): 89-92.
- [14] 谷新晰,卢海强,申畅,等.传统臭鸡蛋腌制中细菌区系变化及挥发性风味物质分析[J].中国食品学报,2020,20(9):296-303.
GU X X, LU H Q, SHEN C, et al. Changes in bacterial flora and analysis of volatile flavor compounds in traditional rotten egg pickling[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 296-303.
- [15] 张永,林鹭,王凯纯,等.冷冻干燥法在水蜜桃加工中的应用[J].安徽农业科学,2017,45(24):91-93.

- ZHANG Y, LIN L, WANG K C, et al. Application of freeze-drying method in the processing of honey peaches [J]. *Anhui Agricultural Science*, 2017, 45 (24): 91-93.
- [16] LEVI C S, ALVITO P, A ANDRÉS, et al. Extending *in vitro* digestion models to specific human populations: Perspectives, practical tools and bio-relevant information [J]. *Trends in Food Science Technology*, 2016, 60: 52-63.
- [17] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in-vitro* digestion method suitable for food - An international consensus[J]. *Food Function*, 2014, 10: 11-23.
- [18] YAO D, XU L, WU M, et al. Effects of microbial community succession on flavor compounds and physicochemical properties during CS sufu fermentation[J]. *LWT-Food Science Technology*, 2021, 152: 112.
- [19] ULUKO H, ZHANG S, LIU L, et al. Effects of thermal, microwave, and ultrasound pretreatments on antioxidative capacity of enzymatic milk protein concentrate hydrolysates[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 18: 1138-1146.
- [20] 张鑫, 马丽苹, 张芸, 等. 茶叶儿茶素对肠道微生物的调节作用[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 232-237.
- ZHANG X, MA L P, ZHANG Y, et al. The regulatory effect of tea catechins on intestinal microbiota [J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 232-237.
- [21] ROHDE J K, FUH M M, EVANGELAKOS I, et al. A gas chromatography mass spectrometry-based method for the quantification of short chain fatty acids[J]. *Metabolites*, 2022, 12(2): 170-172.
- [22] 张莉娟, 谷新晰, 孙记录, 等. 雷山鱼酱酸中微生物多样性及品质特性分析[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(4): 350-359.
- ZHANG L J, GU X X, SUN J L, et al. Analysis of microbial diversity and quality characteristics in leishan fish sauce acid[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22 (4): 350-359.
- [23] YAFETTO L, NSIAH-ASAMOAH C N A, BIRIKORANG E, et al. Biotechnological application of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus delbrueckii* sp. *bulgaricus* for protein enrichment of fermented unmalted and malted sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)[J]. *International Journal of Food Science*, 2022, 2022(1): 2264993.
- [24] 韩荣勋, 石莲花, 金有训, 等. 不同加工方法对禽蛋中蛋白质组成的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40 (8): 211-213.
- HAN X R, SHI L H, JIN Y X, et al. Effect of different processing methods on protein composition of poultry eggs[J]. *The Food Industry*, 2019, 40 (8): 211-213.
- [25] ADERINOLA T A, FAGBEMI T N, ENUJIUGHA V N, et al. Amino acid composition and antioxidant properties of *Moringa oleifera* seed protein isolate and enzymatic hydrolysates [J]. *Heliyon*, 2018, 4 (10): 877.
- [26] HIGASHIDA K, INOUE S, NAKAI N. Iron deficiency attenuates protein synthesis stimulated by branched-chain amino acids and insulin in myotubes [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2020, 531(2): 112-117.
- [27] NIE C X, HE T, ZHANG W J, et al. Branched chain amino acids: Beyond nutrition metabolism[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(4): 954.
- [28] 李玲, 季慧, 康大成, 等. 氧化条件下茶多酚对猪肉肌原纤维蛋白理化性质和凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(2): 12-17.
- LI L, JI H, KANG D C, et al. Effects of tea polyphenols on physicochemical and gel properties of pork myofibrillar protein under oxidation conditions [J]. *Food Science*, 2019, 40(2): 12-17.
- [29] LIN L Z, JIAO M, ZHAO M, et al. *In vitro* gastrointestinal digest of catechin-modified β -conglycinin oxidized by lipoxygenase-catalyzed linoleic acid peroxidation[J]. *Food Chemistry*, 2019, 67(12): 154-163.
- [30] CRUZAT V, MACEDO R, NOEL K, et al. Glutamine: Metabolism and immune function, supplementation and clinical translation [J]. *Nutrients*, 2018, 10(11): 1564.
- [31] AITAK F, FROELICH E, HOLZER P. Gut microbiota and the neuroendocrine system [J]. *Neurotherapeutics the Journal of the American Society for Experimental Neurotherapeutics*, 2018, 15 (1): 5-22.
- [32] ZHOU Y Y, ZHANG N N, ARIKAWA A Y, et al. Inhibitory effects of green tea polyphenols on microbial metabolism of aromatic amino acids in humans

- revealed by metabolomic analysis [J]. *Metabolites*, 2019, 9(5): 96.
- [33] COLOVIC M B, VASIC V M, DJURIC D M, et al. Sulphur-containing amino acids: Protective role against free radicals and heavy metals [J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2018, 25(3): 324–335.
- [34] DEUS V L, BISPO E S, FRANCA A S, et al. Understanding amino acids and bioactive amines changes during on-farm cocoa fermentation [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 97(2): 103776.
- [35] SANDBERG J, KOVATCHEVA-DATCHARY P, BJÖRCK I, et al. Abundance of gut *Prevotella* at baseline and metabolic response to barley prebiotics [J]. *European Journal of Nutrition*, 2019, 58(6): 2365–2376.
- [36] MANIKPURI M, TIWARI K L, TIWARY B N. Effect of seasonal variation on aeromycoflora of Bilaspur, Chhattisgarh, involved in allergic reactions [J]. *Aerobiologia*, 2018, 34(1): 119–126.
- [37] 方芳, 何雨芯, 赵巨堂, 等. 挤压膨化处理对藜麦营养成分及体外酵解特性的影响 [J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 98–106.
- FANG F, HE Y X, ZHAO J T, et al. The effect of extrusion treatment on the nutritional composition and *in vitro* fermentation characteristics of quinoa [J]. *Food Science*, 2023, 44(1): 98–106.
- [38] LIU L, SADABAD M S, GABARRINI G, et al. Riboflavin supplementation promotes butyrate production in the absence of gross compositional changes in the gut microbiota [J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2023, 38(4): 282–297.
- [39] WU H Q, MA Z L, ZHANG D X, et al. Sequential extraction, characterization, and analysis of pumpkin polysaccharides for their hypoglycemic activities and effects on gut microbiota in mice [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 769.

***In Vitro* Digestion of Four Types of Egg Products and Their Effects on Gut Microbiota**

CUI Baoyu, LU Haiqiang, WANG Yuyin, TIAN Hongtao, GU Xinxi*

(College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei)

Abstract Objective: To evaluate the digestive characteristics of boiled, brined, tea-leaf and rotten eggs in the elderly *in vitro* and their effects on intestinal flora. Method: Three elderly *in vitro* digestion models [oral (E_1), oral and gastric (E_2), oral and gastrointestinal (E_3)] were constructed, and healthy adult model (C) was used as a control for exploration. The results demonstrated that the protein content of the four types of egg products ranged from 11.84% to 13.40%, the fat content varied from 7.79% to 16.15%, and the moisture content fluctuated between 68.50% and 76.11%. Among the samples, rotten eggs exhibited the lowest protein content (approximately 11.84%), while their fat content was the highest (approximately 16.15%). The *in vitro* digestion simulation results indicated that the protein digestion rate of rotten eggs was the lowest in elderly individuals (approximately 47%), while the protein digestion rates of the other three types of egg products were comparable (approximately 70%). Furthermore, the study established that E_2 model did not result in a decline in protein digestibility, while E_3 model exerted a substantial impact on the digestion of egg protein, reducing it by approximately 12% to 21%. Subsequent analysis revealed that the relative content of functional amino acids in the stinky egg group was higher than in the other three groups, demonstrating strong biological activity. The study also found that four types of egg products caused changes in the gut microbiota structure of elderly people. A total of 56 genera were identified in the sample group, among which the relative abundance of *Bifidobacterium* genus was the highest. The relative abundance of *Bifidobacterium* in the brined egg group, rotten egg group, boiled egg group and tea-leaf egg group were 51.44%, 47.75%, 47.56% and 44.05%, respectively, and the *B/E* values of the four egg products were 1.27, 1.12, 1.09 and 0.92, respectively, indicating that brined egg and rotten egg had better ability to improve the structure of intestinal flora. A significant variation in the impact of four distinct categories of egg products on the composition of various short-chain fatty acids within the intestinal tract was observed. Notably, the stinky egg group exhibited the most pronounced effect on the release of propionic acid and butyric acid, with concentrations of 1.12 mmol/L and 0.38 mmol/L, respectively.

Keywords eggs; elderly; *in vitro* digestion simulation; intestinal flora; short-chain fatty acid