黄耀莹, 宋兵兵, 袁媛, 等. 鱼鳔胶制备过程中理化特性、美拉德产物变化及其增加骨密度功能 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 442−451. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040223

HUANG Yaoying, SONG Bingbing, YUAN Yuan, et al. Preparation of Fish Swim Bladder Glue: Physicochemical Properties, Changes in Maillard Reaction Products, and Bone Density-Increasing Function[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 442−451. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040223

·营养与保健·

鱼鳔胶制备过程中理化特性、美拉德产物变化及其增加骨密度功能

黄耀莹[1], 宋兵兵[1], 袁　媛[1], 潘旭思[1], 庞宇韬[1], 李嘉彬[1], 钟赛意[1,2,*], 蔡泓滢[3]

（1.广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东湛江 524088;
2.广东海洋大学深圳研究院, 广东深圳 518100;
3.南方海洋科学与工程广东省实验室（湛江）, 广东湛江 524004）

摘　要: 结合传统阿胶工艺，制备新型鱼鳔胶（Swim Bladder Glue，SBG），系统分析其制备过程中理化特性及美拉德产物变化，并与未熬煮鱼鳔胶原蛋白（Swim Bladder Collagen，SBC）及阿胶（E'Jiao，EJ）进行对比。构建去卵巢骨质疏松（OVX）小鼠模型，通过微型计算机断层扫描（Micro-Computed Tomography，Micro-CT）进行骨密度检测以及对肝脏进行 HE 染色。结果表明，SBG 制备时分子量总体降低，以低分子量肽（<5 kDa）为主，微观结构逐渐被破坏，二级结构改变，游离氨基酸总量上升。EJ 和 SBC 分子量集中在 M_W>10 kDa，微观结构更致密，游离氨基酸含量低。美拉德反应上，SBG 在制备过程中，美拉德中期反应产物（美拉德荧光物质、5-羟甲基糠醛）及晚期产物类黑精含量均呈上升趋势，尤其在浓缩阶段增幅显著，反应进程以美拉德中期阶段为主；EJ 含有大量类黑精，主要处于美拉德反应晚期；而 SBC 美拉德反应程度低。SBG 显著增加了去卵巢小鼠股骨骨密度，其中 SBGH 组效果最为显著，BMD 达到 206.44±17.65 mg/cm^3，且对肝脏炎症具有改善作用，然而 EJ 和 SBC 无明显作用。本研究系统分析了鱼鳔胶制备过程中的理化特性演变、美拉德产物动态变化及其增加骨密度功能，为推动鱼鳔资源深度开发以及胶类中药药效物质基础的阐明提供一定的理论依据。

关键词: 鱼鳔, 美拉德反应, 骨质疏松症, 胶原蛋白肽

中图分类号: TS254.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0442−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040223

本文网刊:

Preparation of Fish Swim Bladder Glue: Physicochemical Properties, Changes in Maillard Reaction Products, and Bone Density-Increasing Function

HUANG Yaoying[1], SONG Bingbing[1], YUAN Yuan[1], PAN Xusi[1], PANG Yutao[1], LI Jiabin[1], ZHONG Saiyi[1,2,*], CAI Hongying[3]

（1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University; Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Zhanjiang 524088, China;
2.Shenzhen Research Institute, Guangdong Ocean University, Shenzhen 518100, China;
3.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524004, China）

Abstract: A novel swim bladder glue (SBG) was prepared with reference to the traditional processing technology of E'Jiao. The changes in its physicochemical properties and Maillard reaction products during preparation were systematically

收稿日期: 2025−04−18

基金项目: 深圳市国际合作项目（GJHZ20240218114715029）; 国家重点研发计划（2020YFD0901101）; 广东省高校重点领域专项（2023ZDZX2025）; 广东省高校科技创新团队项目（2021KCXTD021）。

作者简介: 黄耀莹（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 海洋资源利用, E-mail: 18319120030@163.com。

*** 通信作者:** 钟赛意（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与健康、农产品营养与功能化开发, E-mail: zsylxc@126.com。

analyzed, and compared with unprocessed swim bladder collagen (SBC) and commercial EJ. An ovariectomized (OVX) osteoporosis mouse model was established to evaluate therapeutic efficacy, with femoral bone density assessed via micro-computed tomography (Micro-CT) and hepatic histopathology examined through H&E staining. Results demonstrated that SBG predominantly contained low-molecular-weight peptides (<5 kDa), with disrupted microstructure, altered secondary structure, and increased free amino acid content. In contrast, EJ and SBC exhibited dense microstructures and higher molecular weight distributions (>10 kDa). In terms of Maillard reaction, during the preparation of SBG, the contents of mid-stage Maillard reaction products (Maillard fluorescent substances, 5-hydroxymethylfurfural [HMF]) and late-stage product melanoidins all showed an upward trend, with a marked increase, particularly during the concentration stage. The reaction process was dominated by the mid-stage Maillard reaction. In contrast, EJ contained a high level of melanoidins and was mainly in the late stage of the Maillard reaction, while the Maillard reaction degree of SBC was low. SBG significantly increased femoral bone mineral density (BMD) in ovariectomized mice, with the high-dose SBG group (SBGH) exhibiting the most pronounced effect (206.44±17.65 mg/cm^3). Moreover, SBG significantly alleviated liver inflammation, whereas neither EJ nor SBC significantly increased BMD or ameliorated liver inflammation. This study systematically analyzed the evolution of physicochemical properties and dynamic changes of Maillard reaction products during the preparation of SBG, and evaluated its bone density-improving function. The findings provide a theoretical basis for promoting the deep exploitation of swim bladder resources and elucidating the material basis of the medicinal efficacy of gelatinous traditional Chinese medicines.

Key words: fish swim bladder; Maillard reaction; osteoporosis; collagen peptides

鱼鳔（又称花胶、鱼胶或鱼肚）作为药食同源的“海味八珍”之一，其主要成分是胶原蛋白，同时富含糖胺聚糖、脂肪酸及矿物质等生物活性物质[1]。中医理论认为，鱼鳔性味甘、平，入肾经，具有补肾益精、养血止血之功[2]。现代研究证实，鱼鳔胶原蛋白以及胶原蛋白肽展现出保护卵巢[3]、改善生殖[4]、护肝[5]、抗氧化及促愈合[6]等多种生物活性，展现广阔的应用前景。当前鱼鳔加工仍以传统干制工艺为主，通过剖洗、晾晒等流程制成干胶半成品，或进一步开发为即食冻干零食或者保健酒等初级加工产品[7]。如林嘉珣等[8]将鱼鳔与谷物复合，研发出即食风味冻干鱼胶肽零食。尽管这类产品在一定程度上提升了鱼类附加值，但基于鱼鳔胶原蛋白的高附加值产品的研发，及其功效机制研究尚未成熟，导致鱼鳔资源未能充分开发利用。在此背景下，动物胶类中药的制备工艺为鱼鳔资源的创新开发提供了重要思路。传统的动物胶类中药是从富含胶原的哺乳动物组织中经炖煮、浓缩等复杂过程制备而成，多项研究表明其具有抗骨质疏松症潜力[9]。连雅君[10]研究发现狗骨胶可通过调节骨密度、骨代谢水平及 RANKL/RANK/OPG 信号通路抵抗骨质流失。蒙海燕等[11]研究发现鹿茸胶增加成骨细胞数量，降低破骨细胞活性，提高去势大鼠骨密度。然而，哺乳动物来源的动物胶类中药面临朊病毒传播风险、原料资源短缺以及宗教使用禁忌等现实问题，严重制约其市场应用，促使科研人员着手开发其他来源的动物胶剂[12−13]。

骨质疏松症是特征为骨密度低、骨量受损的代谢性骨病[14]，中医将其归属于“骨痹”“骨痿”“骨枯”范畴，在治疗上，中医以“肾主骨”理论为核心，通过补肾填精来治疗骨质疏松[15]。鱼鳔具备低抗原性、低过敏性和良好生物相容性的优点[1]，结合其补肾功效，具有开发为抗骨质疏松新型胶类中药原料的潜力。值得注意的是，美拉德反应广泛存在于食品加工及中药炮制过程中，其产物具有缓解骨骼疾病以及免疫调节等生物活性[16]。Wang 等[17]研究表明，地黄中的活性成分 5-羟甲基糠醛可有效缓解骨关节炎，改善软骨下硬化和软骨退化。Gerardi 等[18]发现来自软面包的类黑精可以调节氧化应激，具有抗炎的生物活性。目前，关于胶类中药成分变化的研究主要聚焦于胶原蛋白及其水解产物、氨基酸等成分[19−20]，而对美拉德反应产物的研究鲜见报道。

因此，本研究以鱼鳔为原料，结合传统阿胶工艺，制备新型鱼鳔胶（Swim Bladder Glue, SBG），系统分析其制备过程中理化特性及美拉德产物变化，并与未熬煮鱼鳔胶原蛋白（Swim Bladder Collagen, SBC）及阿胶（E’Jiao, EJ）进行对比。构建去卵巢骨质疏松（OVX）小鼠模型，通过微型计算机断层扫描（Micro-Computed Tomography, Micro-CT）进行骨密度检测以及对肝脏进行 HE 染色。本研究有利于推动为鱼鳔资源深度开发，有望解决哺乳动物来源动物胶类中药资源短缺和安全隐患问题，以及推动胶类中药药效物质基础的阐明。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

42 只 SPF 雌性 C57BL/6 小鼠　广州科轩生物科技有限公司（合格证编号：SYXK（粤）2024-0204），所有动物实验过程均经广东海洋大学动物管理与使用委员会批准（动物伦理编号：No. GDOU-LAE-2023-041）；鳙鱼干鱼鳔　霞山水产品批发市场；阿胶　山东东阿阿胶有限公司；氨基酸标品（色谱纯）　阿拉丁生物科技有限公司；磷酸盐缓冲液（分析纯）、5-羟甲基糠醛（色谱纯）　上海源叶生物科技有限公司；溴化钾（色谱纯）　美国 Sigma 公司；4% 多聚甲醛（分析纯）　美国 Biosharp 公司；冰糖　太古糖业有

限公司; 绍兴黄酒 浙江古越龙山绍兴酒股份有限公司; 茚三酮(色谱纯) 上海源叶生物科技有限公司。

Kjeltec-8400 凯氏定氮分析仪 丹麦 FOSS 公司; RF-6000 荧光光谱仪 日本 Shimadzu 公司; DGD22-22EWG 电炖锅 广东天际电器股份有限公司; DHG - B50V7 不粘锅、DHG-B50B8 电磁炉 广东小熊电器股份有限公司; LGJ-10 真空冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅 上海虔钧科学仪器有限公司; Cary 60UV-Vis 紫外分光光度计、1260 Infinity II 高效液相色谱 美国 Agilent Technologies 公司; STA 449 F3 Jupiter 同步热分析仪 德国 NETZSCH 公司; TSKgel G3000SWXL 尺寸排阻色谱 日本 Tosoh Bioscience 公司; JSM-7610F 热场发射扫描电镜 日本电子株式会社; S433D 全自动氨基酸分析仪 德国 Sykam GmbH 公司; Micro-CT 系统 瑞士 SCANCO MEDICAL 公司; TENSOR-27 傅里叶变换红外光谱仪 德国 Bruker 公司; FW-4 压片机 天津市拓普仪器有限公司; Agilent1100 液相色谱仪 美国 Agilent 公司; DFY-1000C 摇摆式高速中药粉碎机 温岭大德药机有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

1.2.1.1 鱼鳔胶的制备方法及中间胶液的提取 鱼鳔胶的制备按照阿胶制备的方法稍加修改进行[21]。取干燥鳙鱼鱼鳔粉碎后, 按料液比 1∶30 加入去离子水, 置于炖锅中武火煮沸。待沸腾后转文火维持 80~90 ℃ 恒温浸提, 每 4 h 补充去离子水至初始体积, 连续熬煮 216 h。取出胶液, 所得胶液过 400 目筛, 获取提取液, 提取液注入不粘锅中进行浓缩。在提取液蒸发至粘度为连珠状流下形态, 按鱼鳔原料质量的 2% 添加冰糖, 持续浓缩至膏体呈半透明胶冻状, 即可悬挂成旗时。随后加入 2% 黄酒充分搅拌, 小火加热, 继续浓缩至膏体滴落呈片状(密度 1.35~1.40 g/cm^3), 得到浓缩胶液。所得胶液经−80 ℃ 预冻 24 h 后, 真空冷冻干燥 48 h, 制得 SBG 成品, −20 ℃ 保存。

在 SBG 熬煮的 216 h 过程中, 分别在熬煮时长为 24、48、72、96、120、144、168、192、216 h 取样检测。−80 ℃ 预冻 24 h 后, 真空冷冻干燥 48 h, −20 ℃ 保存备用。制得 SBG 分段样品分别命名为 SBG24、SBG48、SBG72、SBG96、SBG120、SBG144、SBG168、SBG192、SBG216。

1.2.1.2 鱼鳔胶原蛋白的制备方法 鱼鳔胶原蛋白的提取按照黄家宝等[22] 方法稍加修改进行。粉碎后的鱼鳔样品与去离子水以 1∶10(w/v)的重量体积比混合。该水悬浮液在 80 ℃ 下在恒定搅拌下进行 2 h 的热提取。提取后的混合物依次通过两层无菌纱布过滤, 以去除不溶性残留物。澄清后的提取液通过旋转蒸发进行真空浓缩以减少溶剂体积, 然后冻干 48 h 以获得最终的鱼鳔胶原蛋白(SBC)。

1.2.1.3 阿胶预处理 对 EJ 使用粉碎机进行粉碎处理, 直至样品颗粒度达到 100 目的标准。将粉碎后的 EJ 粉末密封保存于干燥避光的容器中, 以备后续实验使用。

1.2.2 成品蛋白质及氨基酸组成测定 依照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》对 SBG、SBC 和 EJ 进行蛋白质的测定[23]。依照 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》进行氨基酸组成测定[24]。

1.2.3 理化特性测定

1.2.3.1 扫描电子显微镜观察 将块状 EJ 切成约 2 mm×2 mm 的切块, 与 SBG、SBG 分段样品、SBC 一同固定于导电胶表面, 经 400 s 真空喷金处理(加速电压 10 kV)后, 采用扫描电子显微镜在 100×放大倍数下观察样品微观结构。

1.2.3.2 分子量分布的测定 依照 GB/T 22492-2008《大豆肽粉》[25], 采用高效液相色谱(Agilent 1260 Infinity III)和 TSKgel G2000SWXL 尺寸排阻色谱柱(7.8 mm×300 mm, Tosoh Bioscience)分析 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的分子量分布。流动相为 0.1%(v/v)三氟乙酸, 20% 乙腈, 流速为 0.5 mL/min。采用紫外-可见分光光度法在 220 nm 处检测洗脱曲线。色谱图使用分子量标准曲线(y=−2.4942x+24.464, y: $\lg M_W$, x: 时间, R^2=0.9863), 该曲线使用具有规定分子量的蛋白质和肽标准物建立。这些标准品的分子量如下: 胰岛素(5754 Da)、杆菌肽(1412 Da)、甘氨酸-甘氨酸-酪氨酸-精氨酸(354 Da)和甘氨酸-甘氨酸-甘氨酸-甘氨酸(75 Da)。

1.2.3.3 傅里叶变换红外光谱分析 使用傅里叶变换红外光谱仪分析分子结构。将 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 与 KBr 粉末以 1∶200(w/w)的质量比均匀混合, 然后手动研磨, 用压片机进行压片。采用 4 cm^{-1} 分辨率和 64 次重叠扫描, 光谱范围为 4000~400 cm^{-1}。

1.2.3.4 游离氨基酸分析 根据王丽等[26] 的方法, 取 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 0.5 g 于液氮中速冻后研磨粉碎, 转移至 10 mL 离心管。加入 5 mL 0.01 mol/L 盐酸(或超纯水), 涡旋振荡混匀 1 min, 沸水浴 30 min。10000×g 离心 10 min(4 ℃), 取上清液; 沉淀复悬于 4 mL 0.01 mol/L 盐酸, 超声提取 5 min(40 kHz, 100 W), 同条件离心后合并两次上清液, 定容至 10 mL。过 0.22 μm 水系滤膜, 收集滤液, 取 400 μL 加入到液相样品瓶中, 由氨基酸自动分析仪测定。

1.2.4 美拉德产物分析

1.2.4.1 美拉德荧光产物的测定 根据 Lertittikul 等[27] 的方法, 将 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 稀释至质量浓度为 1 mg/mL, 在室温下使用荧光分

光光度计进行荧光发射光谱扫描。参数设置：激发波长 347 nm、发射波长 370~550 nm。

1.2.4.2　5-羟甲基糠醛的测定　根据高文军等[28]的方法，精密称取 1 g SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ，加入 5% 乙腈溶液，定容至 10mL，得到浓度为 100 mg/mL 的样品溶液。随后，使溶液通过 0.22 μm 微孔滤膜进行过滤，采用 Agilent C_{18} 色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）作为分离介质，流动相体系为乙腈-水（5∶95，v/v），柱温控制在 30 ℃，流速设定为 1.0 mL/min，检测波长选择 284 nm，进样量为 10 μL。标准曲线是 y=59.415x−8.1843，y：峰面积，x：5-羟甲基糠醛浓度（mg/kg），R^2=0.9948。

1.2.4.3　类黑精含量的测定　根据刘兰涛等[29]的方法，称取 1 g SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ，溶于 50 mL 去离子水中，4000 r/min 离心 5 min，取上清液于 420 nm 波长处测定吸光度，然后按照公式（1）计算样品中类黑精含量。

$$\text{类黑精含量(mg/g)} = \frac{A \times 0.1 \times 50}{0.269} \qquad \text{式（1）}$$

式中：A 为样品在 420 nm 波长处的吸光度；0.269 为溶液中含有 0.1 mg 类黑精时的吸光度。

1.2.5　动物实验

1.2.5.1　动物实验设计　在本研究中，42 只雌性 C57BL/6 小鼠，年龄在 7~8 周之间。根据张力[30]方法随机选取 36 只 7~8 周雌性 C57BL/6 小鼠进行去卵巢造模手术，6 只假手术组小鼠仅切附近部位脂肪。术后休养 1 周，伤口无异常，再将造模组分为模型组 6 只（OVX 组），阿胶组 6 只（EJ），鱼鳔胶原蛋白组 6 只（SBC），鱼鳔胶低剂量组 6 只（SBGL），鱼鳔胶中剂量组 6 只（SBGM），鱼鳔胶高剂量组 6 只（SBGH）。小鼠分组后开始对各组进行灌胃给药，鱼鳔胶低、中、高剂量组分别给予浓度为：0.75、1.5 和 3 g/kg。阿胶组和鱼鳔胶原蛋白组给予浓度为 1.5 g/kg。假手术组和 OVX 模型组分别灌胃给予等体积的蒸馏水。以上各组小鼠每天给药一次，连续 12 周。给药结束后，取出各组小鼠左侧股骨和肝脏组织，剔除骨组织周围的软组织，4% 多聚甲醛固定骨组织和肝脏组织。

1.2.5.2　微型计算机断层扫描　采用微型计算机断层扫描（Micro-CT）对股骨远端干骺端进行检查和成像，体素分辨率为 10.4 μm。光束强度设置为 55 kV 峰值和 148 μA。用 CTan 软件进行小鼠股骨密度的测定。

1.2.5.3　肝脏 HE 染色　肝脏组织经过脱水浸蜡、包埋和切片后常温备用。切片经过不同浓度二甲苯与酒精处理、脱蜡和水洗后，依次用苏木精和伊红染液脱水封片，于 400× 显微镜下拍照观察。

1.3　数据处理

定量数据平行三次，以平均值±标准偏差（SD）表示。采用 SPSS 22.0 软件（IBM Corp, Armonk, NY, USA）中的单向方差分析（ANOVA）进行统计比较。统计显著性定义为 P<0.05。用 CTan 软件进行小鼠股骨密度的测定。

2　结果与分析

2.1　成品基本组成测定

2.1.1　蛋白质组成分析　采用凯氏定氮法测定 EJ、SBC 及 SBG 的蛋白质含量（图 1），结果显示三者蛋白质含量分别为 83.76%±0.20%、98.23%±0.17% 和 98.80%±0.17%，表明三者的成分以蛋白质为主。孙皓岩等[31]研究表明，鱼鳔、驴皮总蛋白含量分别为 98.00%±0.19% 和 97.60%±0.21%，据此推测，驴皮加工过程中蛋白损失率高于鱼鳔，可能是导致 EJ 蛋白质含量较低的原因。

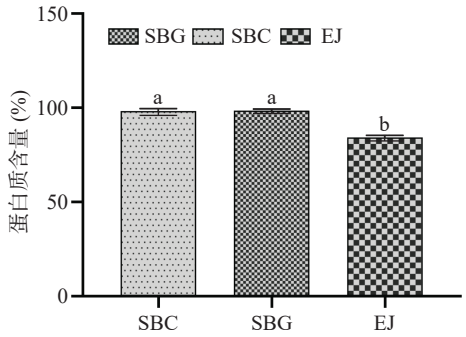


图 1　SBC、SBG 和 EJ 的总蛋白含量

Fig.1　Total protein content of SBC, SBG and EJ

注：图中不同字母表示组间差异显著（P<0.05），图 5~图 6 同。

2.1.2　氨基酸组成分析　所测样品均富含 17 种必需和非必需氨基酸（表 1），其中甘氨酸、脯氨酸、谷氨

表 1　SBC、SBG 和 EJ 的氨基酸组成

Table 1　Amino acid composition of SBC, SBG and EJ

氨基酸	含量(g/100 g)		
	SBC	SBG	EJ
甘氨酸	24.17±0.13^a	24.50±0.07^a	18.54±0.11^b
脯氨酸	13.12±0.10^a	12.29±0.18^a	10.81±0.18^b
谷氨酸	11.47±0.10^a	11.59±0.15^a	9.32±0.08^b
丙氨酸	10.59±0.28^a	10.40±0.23^a	7.19±0.11^b
精氨酸	8.66±0.04^a	8.66±0.05^a	6.48±0.07^b
天冬氨酸	6.34±0.05^a	6.38±0.05^a	5.06±0.05^b
赖氨酸	3.96±0.03^a	3.95±0.04^a	3.36±0.05^b
丝氨酸	3.37±0.04^a	3.35±0.0^a	3.14±0.05^b
苏氨酸	3.16±0.05^a	2.98±0.06^a	1.71±0.04^b
亮氨酸	2.67±0.05^b	2.63±0.05^b	3.06±0.05^a
苯丙氨酸	2.57±0.06^a	2.76±0.05^a	2.05±0.04^b
缬氨酸	2.34±0.04^a	2.45±0.06^a	2.37±0.06^a
异亮氨酸	1.81±0.07^a	1.67±0.06^a	1.44±0.07^b
甲硫氨酸	0.81±0.07^c	2.13±0.05^a	1.13±0.04^b
组氨酸	0.72±0.04^b	0.86±0.05^a	0.78±0.06^{ab}
半胱氨酸	0.63±0.06^a	0.53±0.04^{ab}	0.45±0.04^b
酪氨酸	0.38±0.07^b	0.48±0.07^b	0.74±0.07^a
总氨基酸	96.87±0.29^a	97.72±0.19^a	77.40±0.46^b

注：同行不同字母表示组间差异显著（P<0.05）。

酸、丙氨酸、精氨酸和天冬氨酸为主要成分。SBC 和 SBG 的氨基酸组成相似，与詹永献[32] 测的从鱼鳔中提取的胶原蛋白氨基酸组成相似。EJ 的氨基酸组成与已报道的结果一致[33]。作为胶原蛋白特征性氨基酸，样品中高含量的甘氨酸和脯氨酸组成进一步证实 EJ、SBC 和 SBG 均符合胶原蛋白及其水解物的成分特征[34]。此外，与 EJ 相比，SBC 和 SBG 的氨基酸总含量是 EJ 的 1.25 和 1.26 倍，这一结果与蛋白质含量差异一致。

2.2 理化特性分析

2.2.1 表面形态结构分析 图 2 显示，SBC 为白色致密的块状固体，SBG 为深黄色粉末，而 EJ 为黑褐色块状固体，EJ 的颜色最深，这一差异可能与美拉德反应进程相关[35]。随着熬煮时间的延长，SBG 分段样品从初始致密的块状胶原蛋白冻干品逐步转化为粉末状颗粒，且颜色随制备时间持续而逐渐加深，这一现象可能与熬煮过程中胶原蛋白的水解及美拉德反应的协同作用有关。在扫描电镜下，SBC、EJ 和熬煮了 24 h 后的胶液，呈现出较为致密、有序的胶原蛋白结构，纤维排列紧密且规整，相互交织形成稳定的网络状结构。随着熬煮的持续进行，这一结构开始逐渐被破坏，原本连续、完整的纤维结构出现了断裂，纤维之间的连接变得松散，不再呈现出明显的网络状结构。总的来说，SBG 在制备过程中宏观和微观结构不断被破坏，而 EJ 和 SBC 保持较致密有序的形态。

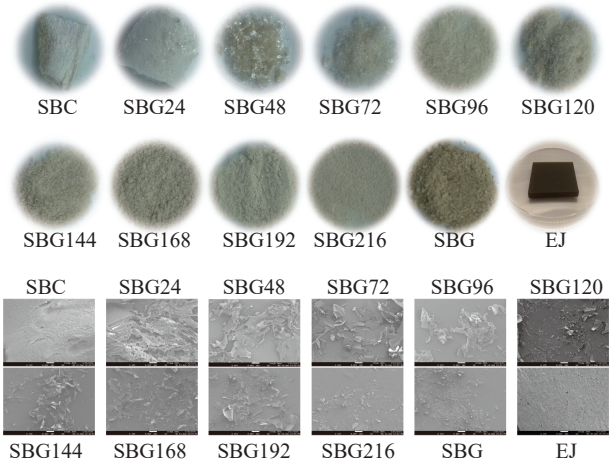


图 2 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的表面形态图

Fig.2 Surface morphology for SBG, time-segmented samples of SBG, SBC, and EJ

注：SEM 标尺：100 μm。

2.2.2 分子量分布分析 随着熬煮时间延长，鱼鳔胶原蛋白整体分子量不断降低，低分子量区域（MW< 5 kDa）含量占比持续上升（表 2）。这表明长时间熬煮会使胶原蛋白的分子结构逐渐被破坏，分解为更小的分子，与前文表面形态结构变化结果相互佐证。相较于熬煮 216 h 未加辅料进行浓缩的胶液，SBG 在低分子量区域（M_W<5 kDa）占比更低，在大分子量区域（M_W>10 kDa）占比较大。这可能是由于在加辅料浓缩过程中，美拉德反应晚期生成了大量的类黑精等高分子量聚合物，从而影响了 SBG 的分子量分布[36]。类黑精色素有研究证明具有一定的生物活性，比如抗炎[37]。虽然在大分子量区域有一定占比，但 SBG 的组成仍主要以低分子量肽（M_W<5 kDa）为主。这种组成特点使其可能具有一定的生物活性。

表 2 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的分子量分布结果

Table 2 Molecular weight distribution results of SBG, time-segmented samples of SBG, SBC, and EJ

组别	400 Da<M_W≤5 kDa (%)	5 kDa<M_W≤10 kDa (%)	M_W>10 kDa (%)
SBC	0.35±0.01	0.67±0.00	98.98±0.00
SBG24	2.55±0.09	5.21±0.04	92.25±0.11
SBG48	5.94±0.02	11.06±0.01	83.03±0.01
SBG72	9.18±0.04	15.81±0.01	75.02±0.04
SBG96	12.89±0.01	20.23±0.01	66.89±0.02
SBG120	16.77±0.06	24.03±0.01	59.20±0.04
SBG144	17.34±0.01	23.11±0.01	59.55±0.01
SBG168	59.80±0.02	13.85±0.01	26.37±0.00
SBG192	62.70±0.05	13.81±0.01	23.51±0.04
SBG216	66.45±0.04	13.45±0.01	20.12±0.06
SBG	63.71±0.00	12.87±0.00	23.46±0.00
EJ	5.92±0.00	8.17±0.00	85.90±0.00

除此之外，EJ 和 SBC 的分子量集中在 M_W> 10 kDa，而 SBG 的分子量分布更为分散，且在低分子量区域有一定占比。其中，EJ 的分子量测定结果与廖峰等[38] 的测定结果相符合。Song 等[39] 研究表明，低分子量肽（M_W<5 kDa）具有更好的肠道通透性，并且具有更高的生物活性。Li 等[40] 研究表明，分子量在 1~3 kDa 之间的胶原蛋白水解物表现出最高的抗骨质疏松活性。因此，SBG 可能具有更强的抗骨质疏松症的活性。

综上，SBG 在熬煮过程中分子量逐步降低，后续浓缩加辅料步骤通过美拉德反应生成高分子量聚合物，导致大分子量区域占比增加，但仍以低分子量肽为主。而 EJ、SBC 分子量集中于大分子量区，SBG 因低分子量肽占比高且可能发生美拉德反应，或为后文增加骨密度功能表现奠定结构基础。

2.2.3 傅里叶变换红外光谱分析 图 3 显示，酰胺 III 带主要对应 CN 键的伸缩振动、酰胺键中 NH 的变形振动，以及甘氨酸主链和脯氨酸侧链的 CH_2 振动[41]。研究表明，酰胺 III 带吸收峰波数与 1450 cm^{-1} 峰的强度比值越接近 1，表明胶原蛋白三螺旋结构越完整；比值越低，则结构破坏越严重[42]。SBC 呈现典型的胶原蛋白三螺旋结构特征。相比之下，SBG、EJ 及熬制过程中的胶液均表现出不同程度的结构破坏，其中 SBG 的破坏程度显著高于 EJ，且随着熬煮时间的延长，三螺旋结构逐渐被破坏。酰胺 A 峰（3500~3000 cm^{-1}）由 NH 和 OH 基团的伸缩振动引起的。与 SBC 和 EJ 相比，SBG 的酰胺 A 峰更宽更强，表明其氢键相互作用更强，且其在制备

过程中变化趋势一致，这归因于 SBG 中低分子量肽段与游离氨基酸含量的增加[39]。在酰胺 I（1700~1600 cm^{-1}，对应 C=O 伸缩振动）和酰胺 II（1600~1500 cm^{-1}，对应 N-H 弯曲与 C-N 伸缩振动）的特征振动区观察到明显蓝移，这表明二级结构从有序向无序转变，官能团所处的化学环境发生改变[43]。总之，说明 SBG 在制备过程中，其二级结构随着熬煮过程不断变化，三螺旋结构逐渐被破坏，EJ 的二级结构同样遭到破坏，但氢键相互作用相较于 SBG 并不明显，SBC 具有典型的胶原蛋白三螺旋结构吸收特征。

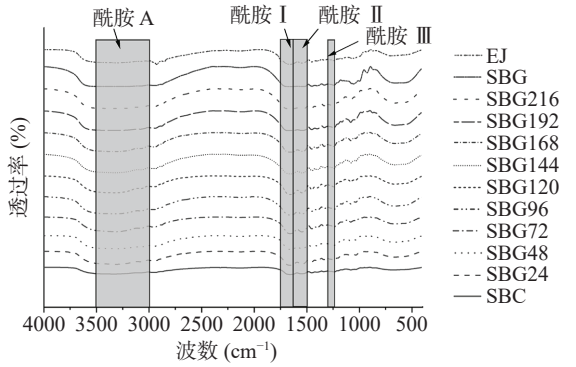


图 3　SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的傅里叶变换红外光谱结果图

Fig.3　Fourier transform infrared spectra of SBG, time-segmented samples of SBG, SBC and EJ

2.2.4　游离氨基酸含量分析　SBG 中游离氨基酸组成丰富，含量最高的五种游离氨基酸为天冬氨酸、甘氨酸、苏氨酸、异亮氨酸和丙氨酸（表 3）。制备过程中，SBG 的氨基酸含量呈现显著上升趋势（$P<0.05$），结合上文分子量测定结果，这一现象可归因于熬制过程促使胶原蛋白逐步降解为小分子肽，进而水解生成更多游离氨基酸。EJ 除缬氨酸、酪氨酸、半胱氨酸和蛋氨酸外，其余游离氨基酸均显著低于 SBG（$P<0.05$）；SBC 除缬氨酸、酪氨酸外，其余亦显著低于 SBG（$P<0.05$），且二者游离氨基酸总含量远低于 SBG。

食物中游离氨基酸及其衍生物不仅赋予食品独特风味，更具有多元健康价值[44]。本研究检测到 SBG、EJ 和 SBC 均含有甘氨酸、异亮氨酸、丙氨酸等具有抗骨质疏松活性的药效氨基酸[45–46,4747]。SBG 的药效氨基酸含量在制备过程中呈现显著上升趋势，其含量分别为 EJ 的 4.91 倍和 SBC 的 24.07 倍，这提示 SBG 可能具有更优的抗骨质疏松症应用价值。此外，缬氨酸和半胱氨酸的含量呈现先升后降的趋势，苯丙氨酸和酪氨酸则表现为先升后降再升的波动特征，含量的变动可能和美拉德反应有关。已有研究表明氨基酸的美拉德反应产物具有抗炎、抗氧化、治疗伤口愈合等生物活性[48]。如 Oh 等[49] 研究发现，由赖氨酸和半乳糖制备的美拉德反应产物 Lys-Gal MRP 具有一定的抗炎作用。因此，可合理推测 SBG 制备过程中可能生成具有生物活性的美拉德反应产物，从而赋予 SBG 独特的生物活性。

综上所述，SBG 的游离氨基酸总含量显著高于 EJ 和 SBC，其制备过程中的氨基酸动态变化与胶原蛋白降解及美拉德反应密切相关。SBG 不仅富含具有抗骨质疏松活性的药效氨基酸，其制备过程中生成的美拉德反应产物亦可能为 SBG 的生物活性提供协同贡献。

表 3　SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的游离氨基酸含量（g/100 g）

Table 3　Free amino acid content (g/100 g) in SBG, time-segmented samples of SBG, SBC and EJ

氨基酸	SBC	SBG24	SBG48	SBG72	SBG96	SBG120	SBG144	SBG168	SBG192	SBG216	SBG	EJ
Asp	0.06±0.01^{k}	0.10±0.00^{k}	0.51±0.00^{j}	1.08±0.01^{h}	2.34±0.01^{g}	3.29±0.07^{f}	4.88±0.05^{e}	6.19±0.02^{d}	9.03±0.14^{c}	10.95±0.11^{b}	11.39±0.12^{a}	0.21±0.01^{j}
Glu#	0.07±0.00^{i}	0.09±0.01^{hi}	0.15±0.01^{g}	0.21±0.00^{f}	0.28±0.01^{e}	0.33±0.02^{d}	0.40±0.02^{c}	0.42±0.04^{c}	0.49±0.01^{b}	0.50±0.01^{ab}	0.51±0.01^{a}	0.10±0.00^{h}
Ser#	0.04±0.00^{l}	0.07±0.00^{k}	0.16±0.00^{j}	0.25±0.00^{i}	0.44±0.01^{g}	0.58±0.01^{f}	0.76±0.01^{e}	0.90±0.01^{d}	1.15±0.02^{c}	1.32±0.01^{b}	1.38±0.01^{a}	0.35±0.00^{h}
His	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.01±0.01^{f}	0.02±0.00^{e}	0.03±0.00^{d}	0.04±0.00^{c}	0.04±0.00^{c}	0.05±0.00^{b}	0.05±0.00^{b}	0.05±0.00^{b}	0.08±0.00^{a}	0.03±0.00^{d}
Gly#	0.14±0.01^{l}	0.27±0.00^{k}	0.62±0.02^{j}	1.05±0.00^{i}	1.94±0.04^{g}	2.49±0.03^{f}	3.28±0.03^{e}	3.73±0.03^{d}	4.81±0.06^{c}	5.571±0.04^{b}	5.99±0.04^{a}	0.95±0.01^{h}
Thr#	0.14±0.01^{j}	0.27±0.00^{j}	0.62±0.02^{i}	1.05±0.00^{h}	1.94±0.04^{g}	2.49±0.03^{f}	3.28±0.03^{e}	3.73±0.03^{d}	4.81±0.06^{c}	5.57±0.04^{b}	5.99±0.04^{a}	0.95±0.01^{j}
Arg#	0.03±0.00^{i}	0.04±0.00^{i}	0.06±0.01^{hi}	0.09±0.00^{gh}	0.16±0.01^{f}	0.17±0.08^{f}	0.32±0.01^{e}	0.40±0.00^{d}	0.47±0.02^{c}	0.66±0.01^{b}	0.76±0.02^{a}	0.13±0.00^{fg}
Ala#	0.09±0.02^{j}	0.09±0.00^{j}	0.17±0.00^{i}	0.25±0.00^{h}	0.43±0.01^{g}	0.59±0.02^{f}	0.76±0.01^{e}	0.89±0.07^{d}	1.10±0.07^{c}	1.21±0.02^{b}	1.55±0.00^{a}	0.43±0.00^{h}
Tyr	0.03±0.00^{hi}	0.04±0.00^{gh}	0.06±0.01^{g}	0.09±0.00^{f}	0.16±0.01^{e}	0.17±0.08^{d}	0.32±0.01^{c}	0.26±0.01^{b}	0.26±0.00^{b}	0.29±0.00^{a}	0.035±0.00^{i}	0.12±0.01^{f}
Val	0.08±0.00^{b}	0.09±0.01^{b}	0.06±0.02^{b}	0.06±0.03^{b}	0.09±0.00^{b}	0.33±0.15^{a}	0.16±0.04^{ab}	0.20±0.05^{ab}	0.27±0.09^{ab}	0.27±0.06^{ab}	0.26±0.04^{ab}	0.06±0.04^{b}
Met#	0.09±0.02^{c}	0.09±0.00^{bc}	0.17±0.00^{bc}	0.25±0.01^{bc}	0.43±0.01^{ab}	0.59±0.02^{ab}	0.76±0.01^{ab}	0.89±0.07^{a}	1.10±0.07^{ab}	1.21±0.02^{ab}	1.55±0.00^{ab}	0.43±0.00^{ab}
Phe	0.01±0.00^{j}	0.02±0.01^{j}	0.19±0.01^{de}	0.22±0.01^{cd}	0.13±0.01^{hi}	0.09±0.02^{i}	0.26±0.02^{bc}	0.16±0.00^{eh}	0.27±0.00^{b}	0.19±0.08^{de}	0.35±0.02^{a}	0.12±0.01^{hi}
Ile#	0.05±0.00^{h}	0.13±0.01^{h}	0.28±0.01^{g}	0.46±0.02^{f}	0.84±0.02^{e}	1.10±0.02^{d}	1.37±0.01^{c}	1.39±0.01^{c}	1.75±0.03^{b}	1.96±0.04^{a}	2.02±0.02^{a}	0.22±0.00^{g}
Lys#	0.00±0.00^{i}	0.05±0.00^{h}	0.07±0.01^{g}	0.10±0.00^{f}	0.16±0.01^{e}	0.18±0.01^{de}	0.33±0.02^{b}	0.19±0.01^{d}	0.39±0.01^{a}	0.24±0.01^{c}	0.39±0.03^{a}	0.12±0.01^{f}
Leu#	0.03±0.00^{j}	0.03±0.01^{j}	0.07±0.02^{i}	0.09±0.00^{h}	0.20±0.02^{f}	0.24±0.01^{e}	0.30±0.02^{d}	0.35±0.01^{c}	0.45±0.01^{b}	0.51±0.02^{a}	0.50±0.01^{a}	0.16±0.04^{g}
Cys	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.01±0.00^{cd}	0.00±0.00^{cd}	0.02±0.00^{cd}	0.01±0.00^{cd}	0.01±0.00^{cd}	0.06±0.04^{b}	0.02±0.01^{cd}	0.02±0.02^{cd}	0.03±0.02^{c}	0.33±0.00^{a}
Pro#	0.03±0.00^{b}	0.08±0.01^{b}	0.11±0.01^{ab}	0.14±0.04^{ab}	0.30±0.03^{ab}	0.30±0.06^{ab}	0.69±0.05^{ab}	0.31±0.07^{ab}	0.93±0.07^{ab}	1.00±0.03^{ab}	1.10±0.17^{a}	0.23±0.02^{ab}
药效氨基酸	0.55±0.04^{i}	0.88±0.03^{f}	1.82±0.05^{e}	2.75±0.05^{h}	4.48±0.05^{g}	5.73±0.29^{f}	7.59±0.14^{e}	8.49±0.31^{d}	10.87±0.15^{c}	11.97±0.2^{b}	13.24±0.05^{a}	2.70±0.13^{h}
氨基酸总量	0.75±0.09^{l}	1.17±0.09^{k}	2.68±0.21^{j}	4.27±0.22^{h}	7.24±0.29^{g}	9.69±0.62^{f}	13.17±0.46^{e}	20.12±0.21^{d}	27.35±0.23^{c}	31.52±0.17^{b}	33.89±0.23^{a}	3.60±0.18^{i}

注：抗骨质疏松症药效氨基酸包括谷氨酸、丝氨酸、甘氨酸、苏氨酸、精氨酸、丙氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、赖氨酸、亮氨酸、脯氨酸，在表中以#表示。同行不同上标字母的数值表示在$P<0.05$水平上存在显著差异；n=3。

2.3 美拉德产物分析

2.3.1 美拉德荧光产物分析 美拉德反应由一系列级联反应构成,其中级阶段生成的荧光聚合产物通过与蛋白质和氨基酸交联形成,其生成与消耗的动态变化是判断反应进程的关键指标[49]。SBG 制备过程中,美拉德反应荧光产物含量持续上升,浓缩阶段尤为显著,表明反应以中期为主导(图 4)。同时,峰高波长发生红移,说明在制备过程中,荧光产物的组成在不断变化[50]。相比之下,EJ 的荧光发射波长呈现蓝移,反映其与 SBG 的荧光产物组成差异;SBG 成品荧光产物含量高于 EJ,推测因 EJ 的美拉德反应以晚期阶段为主导,荧光物质大量转化为类黑精等终产物,导致荧光产物累积量降低[51]。SBC 的荧光产物含量远低于 SBG,可能是因为 SBC 美拉德反应程度降低。总的来说,鱼鳔胶在制备过程中美拉德反应以中期为主;EJ 可能主要处于晚期阶段,而 SBC 的美拉德反应程度较低。

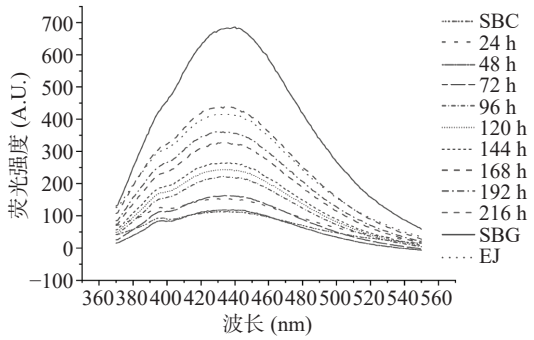


图 4 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的美拉德荧光产物测定图

Fig.4 Maillard reaction fluorescent products determination graph for SBG, time-segmented samples of SBG, SBC and EJ

2.3.2 5-羟甲基糠醛含量分析 5-羟甲基糠醛(5-HMF)作为中期产物的代表,是加热加工和制备多种食品和中药制剂过程中常见的反应产物。本研究发现,在 SBG 熬制过程中,直至第 144 h 才检测出 5-HMF(图 5)。随着熬制时间进一步延长,5-HMF 含量持续上升,尤其是在浓缩阶段,其含量大幅提升。

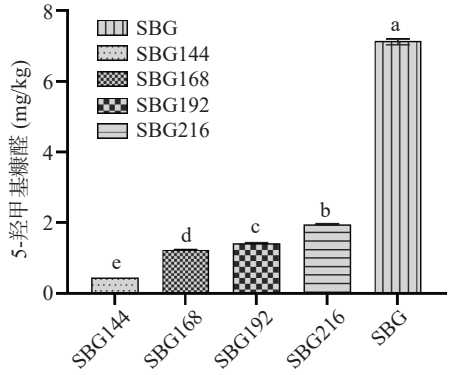


图 5 SBG 和 SBG 分段样品的 5-HMF 含量

Fig.5 5-HMF content for SBG, and time-segmented samples of SBG

制备过程中未检测出 5-HMF 是由于加热的时间较短,游离氨基酸和小分子多肽的含量较低,美拉德反应的程度较低,与前文测定的美拉德中间产物的含量较低结果相对应。与之形成对比的是,在 SBC 和 EJ 中,均未检测出 5-HMF。

5-HMF 作为美拉德反应的中期产物,在阿胶中未被检测出,很可能是因为阿胶的美拉德反应已进行至晚期[52]。近年来,5-HMF 已被证实有多种生物活性。Ziadlou 等[53] 研究表明,5-HMF 对人骨关节炎软骨细胞炎症反应,表现出抗分解代谢和抗炎作用。Wang 等[54] 研究表明,地黄中的活性成分 5-HMF 可有效缓解骨关节炎、改善软骨下硬化和软骨退化。

综合来看,SBC 和 EJ 未检出 5-HMF,SBG 在熬煮过程中,5-HMF 含量会随着熬煮时长和浓缩阶段发生显著变化(P<0.05),5-HMF 的存在可能赋予 SBG 在缓解骨质疏松症方面的潜在价值。

2.3.3 类黑精含量分析 类黑精(Melanoidins)是高聚合、棕色、含氮的美拉德反应最终产物。本研究发现,SBG 制备过程中类黑素浓度呈现显著的时间依赖性增长趋势(P<0.05),表明美拉德反应晚期阶段的进程随熬煮时间的延长持续推进(图 6)。值得注意的是,在浓缩阶段类黑精含量大幅上升,可能与黄酒和冰糖的辅料有关。黄酒本来就含有大量的类黑精色素[55],以及冰糖的加入提供了还原糖,推动了美拉德反应进程。目前许多研究表明,类黑精具有多种生物活性,包括抗炎、抗氧化。Ding 等[56] 研究发现,高粱醋中的类黑精对 CCl_4 诱导的大鼠肝损伤表现出显著的保护作用,抑制肝脏脂质过氧化和活性氧的水平,同时恢复抗氧化酶活性。由此推测,SBG 制备过程中类黑精的持续生成,促成了其整体生物活性的显著提升。

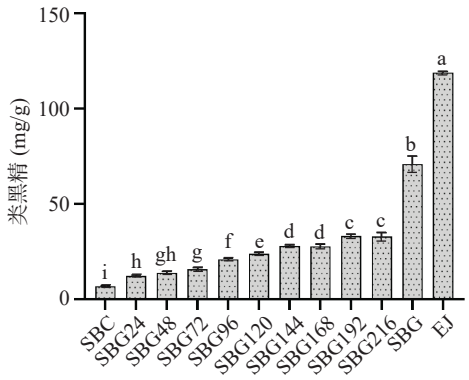


图 6 SBG、SBG 分段样品、SBC 及 EJ 的类黑精含量

Fig.6 Melanoidins content for SBG, time-segmented samples of SBG, SBC, and EJ

然而,EJ 的类黑精含量显著高于 SBG(P<0.05),结合前文测定的美拉德中间产物和 5-HMF 含量测定结果,表明其美拉德反应晚期进程更为深入。此外,SBG 的类黑精含量是 SBC 的 10.51 倍(P<0.001)。总的来说,SBG 在制备过程中,类黑精的含量不断提

高，且在浓缩阶段类黑精含量大幅上升，而 EJ 在熬制过程中表现出更高浓度的类黑精水平，表明其美拉德反应晚期进程更为深入；SBC 的美拉德反应处于极低水平。

2.4　鱼鳔胶对去卵巢小鼠的影响

2.4.1　鱼鳔胶对去卵巢小鼠股骨骨密度的影响　基于 EJ、SBC 和 SBG 在理化特性和美拉德反应活性产物方面存在明显差异，为进一步探究三者的实际生物活性，特别是骨健康领域作用的不同，本研究采用 Micro-CT 检测小鼠股骨远端骨密度（BMD）（图 7）。OVX 组小鼠股骨远端 BMD 较假手术组显著降低（P<0.001），证实骨质疏松模型建立成功。与 OVX 组相比，SBG 各剂量组 BMD 显著升高（P<0.001），其中 SBGH 组效果最为显著，BMD 达到 206.44±17.65 mg/cm^3。EJ 组和 SBC 组与 OVX 组相比，BMD 无统计学差异。上述结果表明，SBG 有增加骨密度的作用，而 EJ 和 SBC 未显示显著疗效，进一步验证了 SBG 具有缓解骨质疏松症的潜力。

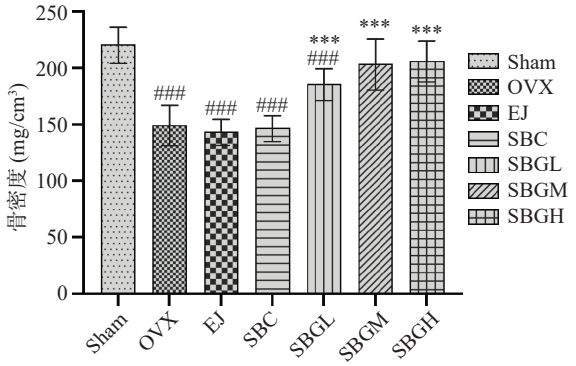


图 7　各组小鼠股骨骨密度定量结果

Fig.7　Results of quantitative of BMD of mice femur in each group

注：###P<0.001（与 Sham 组比较）；***P<0.001（与 OVX 组比较）。

2.4.2　各组小鼠肝病理变化分析　各组小鼠肝组织切片 HE 染色可见（图 8），Sham 组肝小叶结构正常，肝细胞清晰可见排列整齐，细胞核、细胞质无明显病理变化。在 OVX 中肝小叶周围出现炎症细胞浸润，并且 OVX 组小鼠肝脏且出现出血现象。与 OVX 组比，SBG 组未见明显炎症浸润现象，而 EJ 组和 SBC 组仍有一定程度的炎症浸润现象。以上结果说明，SBG 可改善骨质疏松导致的肝脏炎症反应，而 SBC 和 EJ 的改善作用不明显。

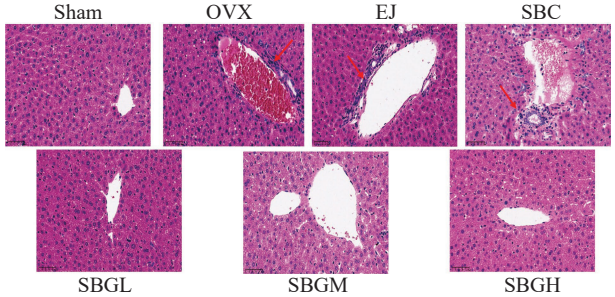


图 8　各组小鼠肝脏 HE 染色

Fig.8　HE staining microscope images of liver

注：HE 染色标尺：100 μm。

3　结论

本研究探讨 SBG 制备过程中理化特性和美拉德产物的变化，以及 SBG 对 OVX 小鼠骨密度的影响。SBG 制备时分子量先降低后因美拉德反应使大分子量区域占比增加但仍以低分子量肽为主，微观结构和二级结构改变，游离氨基酸总量上升。EJ 和 SBC 分子量集中在 MW>10 kDa，微观结构更致密，游离氨基酸含量低。美拉德产物分析结果显示，SBG 在制备过程中，美拉德荧光产物、5-羟甲基糠醛和类黑精含量均呈上升趋势，尤其在浓缩阶段增幅显著，反应进程以美拉德中期阶段为主；EJ 主要处于美拉德反应晚期，含有大量类黑精，而 SBC 美拉德反应程度低。SBG 有效提高 OVX 小鼠骨密度，而 EJ 和 SBG 无此疗效。SBG 可缓解 OVX 小鼠肝脏的炎症反应，而 SBC 和 EJ 的改善作用不明显。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] CHEN Rui, LIU Zhe, WANG Jinze, et al. A review of the nutritional value and biological activities of sturgeon processed byproducts[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1024309.

[2] GE Enhui, ZHA Rui, GAO Qing, et al. Preventive effect of swim bladder hydrolysates on cyclophosphamide-induced ovarian injury in mice[J]. Journal of Obstetrics and Gynaecology Research, 2022, 48(2): 420−430.

[3] ZHANG Mingyi, CHEN Ting, HU Jiaruo, et al. Collagen (peptide) extracted from sturgeon swim bladder: Physicochemical characterization and protective effects on cyclophosphamide-induced premature ovarian failure in mice[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142217.

[4] ZHAO Xi, SANG Mengmeng, HAN Ping, et al. Peptides from the croceine croaker (*Larimichthys crocea*) swim bladder attenuate busulfan-induced oligoasthenospermia in mice[J]. Pharmaceutical Biology, 2022, 60(1): 319−325.

[5] SHI Yiting, YU Fengjie, WU Yi, et al. Identification of a novel peptide that activates alcohol dehydrogenase from crucian carp swim bladder and how it protects against acute alcohol-induced liver injury in mice[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2022, 207: 114426.

[6] CHEN Yingyue, JIN Huoxi, YANG Fei, et al. Physicochemical, antioxidant properties of giant croaker (*Nibea japonica*) swim bladders collagen and wound healing evaluation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138: 483−491.

[7] 朱凯悦, 孙娜, 董秀萍, 等. 鱼胶的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 284−290. [ZHU Kaiyue, SUN Na, DONG Xiuping, et al. Research progress of isinglass[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 284−290.]

[8] 林嘉珣. 一种即食风味冻干鱼胶肽零食产品及其制备方法

[P]. 中国: CN202311442154.1, 2023-12-22. [LIN Jiaxun. A ready-to-eat flavored freeze-dried fish gelatin peptide snack product and its preparation method[P]. China: CN202311442154.1, 2023-12-22.]
[9] LIANG Jingyi, YANG Fei, LI Zixiao, et al. Epigenetic regulation of the inflammatory response in stroke[J]. Neural Regeneration Research, 2025, 20(11): 3045−3062.
[10] 连雅君. 狗骨胶、双膝骨胶宝抗骨质疏松症大鼠的疗效观察及 RANKL/OPG/TRAF6 信号通路研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2021. [LIAN Y J. Efficacy observation of dog bone gelatin and Shuangxi Gujiaobao in anti-osteoporosis rats and study on RANKL/OPG/TRAF6 signaling pathway[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2021.]
[11] 蒙海燕, 曲晓波, 李娜, 等. 鹿茸及鹿角胶对去卵巢大鼠骨质疏松症的影响[J]. 中药材, 2009, 32(2): 179−182. [MENG Haiyan, QU Xiaobo, LI Na, et al. Effects of pilose antler and antler glue on osteoporosis of ovariectomized rats[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2009, 32(2): 179−182.]
[12] ZHANG Xi, OOKAWA M, TAN Yongkai, et al. Biochemical characterisation and assessment of fibril-forming ability of collagens extracted from Bester sturgeon *Huso huso×Acipenser ruthenus*[J]. Food Chemistry, 2014, 160: 305−312.
[13] BARZKAR N, SUKHIKH S, BABICH O, et al. Marine collagen: Purification, properties and application[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1245077.
[14] van der BURGH A C, de KEYSER C E, ZILLIKENS M C, et al. The effects of osteoporotic and non-osteoporotic medications on fracture risk and bone mineral density[J]. Drugs, 2021, 81(16): 1831−1858.
[15] AN Jing, YANG Hao, ZHANG Qian, et al. Natural products for treatment of osteoporosis: The effects and mechanisms on promoting osteoblast-mediated bone formation[J]. Life Sciences, 2016, 147: 46−58.
[16] GUAN Dongsheng, LI Yingxia, CUI Yinglin, et al. 5-HMF attenuates inflammation and demyelination in experimental autoimmune encephalomyelitis mice by inhibiting the MIF-CD74 interaction[J]. Acta Biochimica et Biophysica Sinica, 2023, 55(8): 1222−1233.
[17] WANG Xinyu, HAN Xiaolong, MA Jinjin, et al. 5-hydroxymethylfurfural attenuates osteoarthritis by upregulating of glucose metabolism in chondrocytes[J]. Phytomedicine, 2025, 139: 156499.
[18] GERARDI G, TEMIÑO V, SALAZAR-MARDONES G, et al. Bioaccessible bread melanoidins modulate oxidative stress, reduce inflammation and suppress adhesion of *Helicobacter pylori* to caco-2 cells[J]. Nutrients, 2025, 17(4): 648.
[19] ZHANG Guowei, GUO Fengxian, ZENG Maomao, et al. The immune-enhancing effect and *in vitro* antioxidant ability of different fractions separated from Colla Corii Asini[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(11): e14174.
[20] ZHANG He, PAN Daian, DONG Ying, et al. Transdermal permeation effect of collagen hydrolysates of deer sinew on mouse skin, ex vitro, and antioxidant activity, increased type I collagen secretion of percutaneous proteins in NIH/3T3 cells[J]. Journal of Cosmetic Dermatology, 2020, 19(2): 519−528.
[21] 杨福安, 王京娥. 阿胶[M]. 北京: 文化艺术出版社, 2013: 96-98. [YANG Fuan, WANG Jing'e. E'Jiao[M]. Beijing: Culture and Art Publishing House, 2013: 96-98.]
[22] 黄家宝, 邓旗, 薛梦凡, 等. 不同方法提取红鳍笛鲷鱼鳞胶原蛋白的结构和理化特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 210−218. [HUANG Jiabao, DENG Qi, XUE Mengfan, et al. Characterization of collagens from scale of *Lutjanus erythropterus* by different extraction methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(9): 210−218.]
[23] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of protein in food: GB 5009.5-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[24] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定: GB 5009.124-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health Commission of the People's Republic of China. Determination of Amino Acids in Food Safety National Standards: GB 5009.124-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[25] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 22492-2008 食品安全国家标准 大豆肽粉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 4−5. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 22492-2008 National food safety standard —Soybean peptide powder[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 4−5.]
[26] 王丽, 宋志峰, 纪锋, 等. 高效液相色谱法测定大豆中游离氨基酸含量[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(1): 180−184. [WANG Li, SONG Zhifeng, JI Feng, et al. Determination of free amino acids in soybean by high performance liquid chromatography[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(1): 180−184.]
[27] LERTITTIKUL W, BENJAKUL S, TANAKA M. Characteristics and antioxidative activity of Maillard reaction products from a porcine plasma protein–glucose model system as influenced by pH[J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 669−677.
[28] 高文军, 张争明, 张娇, 等. 鹿皮胶浓缩工艺优化及质量控制指标研究[J]. 中药材, 2022, 45(11): 2703−2707. [GAO Wenjun, ZHANG Zhengming, ZHANG Jiao, et al. Optimization of concentration process and quality control index of deerskin gum[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2022, 45(11): 2703−2707.]
[29] 刘兰涛, 杨小兰. 山西老陈醋醋泥冻干粉对高脂饮食小鼠的降血脂与抗氧化作用[J]. 食品科学, 2015, 36(9): 141−145. [LIU Lantao, YANG Xiaolan. Hypolipidemic and antioxidant effects of freeze-dried powder of Shanxi mature vinegar in hyperlipidaemic mice[J]. Food Science, 2015, 36(9): 141−145.]
[30] 张力. 曲古抑菌素 A 对去卵巢小鼠骨质疏松症的治疗作用研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2020. [ZHANG Li. Therapeutic effect of trichostatin a on teoporosis in ovariectomized mice[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2020.]
[31] 孙皓岩, 胡淑曼, 魏宝红, 等. 鱼鳔与驴皮的化学成分及对环磷酰胺所致贫血小鼠的改善作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 338−345. [SUN Haoyan, HU Shuman, WEI Baohong, et al. Chemical components of swim bladder and donkey skin and their improvement effects on cyclophosphamide-induced Anemia mice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 338−345.]
[32] 詹永献. 草鱼鱼鳔胶原蛋白理化性质及结构特点的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012. [ZHAN Yongxian. Physicochemical properties and structural characteristics of collagen from grass carp of swimming bladder[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2012.]
[33] 霍光华. 阿胶氨基酸矿物成分分析与评价[J]. 氨基酸和生物资源, 1996(4): 22−24,33. [HUO Guanghua. Analysis and evaluation of amino acids and mineral composition in Colla Corii Asini[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 1996(4): 22−24,33.]

［34］ ZOU Ye, WANG Li, CAI Panpan, et al. Effect of ultrasound assisted extraction on the physicochemical and functional properties of collagen from soft-shelled turtle calipash[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105: 1602−1610.
［35］ SHI Boshan, GUO Xue, LIU Hongyan, et al. Dissecting Maillard reaction production in fried foods: Formation mechanisms, sensory characteristic attribution, control strategy, and gut homeostasis regulation[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 137994.
［36］ WANG Kuaitian, TANG Ning, BIAN Xiaojia, et al. Structural characteristics, chemical compositions and antioxidant activity of melanoidins during the traditional brewing of *Monascus* vinegar [J]. LWT, 2024, 209: 116760.
［37］ ALMEIDA-JUNIOR S, de OLIVEIRA K R P, MARQUES L P, et al. *In vivo* anti-inflammatory activity of BACCHARIN from BRAZILIAN green PROPOLIS[J]. Fitoterapia, 2024, 175: 105975.
［38］ 廖峰, 樊雨梅, 帖航, 等. 阿胶蛋白质组学研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 122−129. ［LIAO Feng, FAN Yumei, TIE Hang, et al. Protein components of protein in Colla Corii Asini[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 122−129.］
［39］ SONG Ruiyu, DAI Taotao, DENG Lizhen, et al. Ultrafiltration fractionation of rice protein hydrolysates: Physicochemical properties and potential biological activities of different rice protein hydrolysate fractions[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103418.
［40］ LI Na, LIU Zhangwen, LI Wenhua, et al. Biocompatible and bioactive yak bone collagen hydrolysates with controllable molecular weight for effective prevention of osteoporosis[J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105776.
［41］ 尹朝阳, 刘杨柳, 陈智慧, 等. 焦磷酸钠改性对中华鳖明胶性质和结构的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 72−84. ［YIN Zhaoyang, LIU Yangliu, CHEN Zhihui, et al. Effects of sodium pyrophosphate modification on the properties and structure of Chinese soft-shelled turtle (*Pelodiscus sinensis*) gelatin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(1): 72−84.］
［42］ CHEN Junde, LI Long, YI Ruizao, et al. Extraction and characterization of acid-soluble collagen from scales and skin of tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 66: 453−459.
［43］ WANG Shirang, WANG Tengyu, SUN Yue, et al. Effects of high hydrostatic pressure pretreatment on the functional and structural properties of rice bran protein hydrolysates[J]. Foods, 2021, 11(1): 29.
［44］ HE Quan, HUANG Shaohui, WU Yuehong, et al. Comparative study on the composition of free amino acids and derivatives in the two botanical origins of an edible Chinese herb "Xiebai", i. e., *Allium chinense* G. Don and *Allium macrostemon* Bunge species[J]. Food Research International, 2018, 106: 446−457.
［45］ MORO T, EBERT S M, ADAMS C M, et al. Amino acid sensing in skeletal muscle[J]. Trends in Endocrinology & Metabolism, 2016, 27(11): 796−806.
［46］ HAN N R, KIM H Y, YANG W M, et al. Glutamic acid ameliorates estrogen deficiency–induced menopausal-like symptoms in ovariectomized mice[J]. Nutrition Research, 2015, 35(9): 774−783.
［47］ LÜ Ziquan, SHI Wenbiao, ZHANG Qian, et al. Role of essential amino acids in age-induced bone loss[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(19): 11281.
［48］ BETTIS T, KIM B J, HAMRICK M W. Impact of muscle atrophy on bone metabolism and bone strength: Implications for muscle-bone crosstalk with aging and disuse[J]. Osteoporosis International, 2018, 29(8): 1713−1720.
［49］ OH J G, CHUN S H, KIM D H, et al. Anti-inflammatory effect of sugar-amino acid Maillard reaction products on intestinal inflammation model *in vitro* and *in vivo*[J]. Carbohydrate Research, 2017, 449: 47−58.
［50］ MATIACEVICH S B, PILAR BUERA M. A critical evaluation of fluorescence as a potential marker for the Maillard reaction [J]. Food Chemistry, 2006, 95(3): 423−430.
［51］ CAO Jiarong, YAN Haixia, LIU Ling. Optimized preparation and antioxidant activity of glucose-lysine Maillard reaction products[J]. Lwt, 2022, 161: 113343.
［52］ 李昕静. 玉米肽美拉德反应进程表征及其中间产物热加工适应性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. ［LI Xinjing. Indication of corn peptides Maillard reaction process and thermal processing adaptability of Maillard reaction intermediates[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.］
［53］ ZIADLOU R, BARBERO A, STODDART M J, et al. Regulation of inflammatory response in human osteoarthritic chondrocytes by novel herbal small molecules[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(22): 5745.
［54］ WANG X, HAN X, MA J, et al. 5-hydroxymethylfurfural attenuates osteoarthritis by upregulating glucose metabolism in chondrocytes[J]. Phytomedicine, 2025, 139: 156499.
［55］ 张会娟, 邱聪, 田青, 等. 黄酒类黑精的提取、成分及光谱特性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 57−62. ［ZHANG Huijuan, QIU Cong, TIAN Qing, et al. Extraction, composition and spectral properties of melanoidins from Chinese rice wine[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 57−62.］
［56］ DING Xuefeng, ZHANG Yanbei, LI Jie, et al. Structure, spectral properties and antioxidant activity of melanoidins extracted from high temperature sterilized *Lotus rhizome* juice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132171.