

红鲮鱼胶对秀丽隐杆线虫的体内抗衰老作用

田秉昕^{1,2}, 钟碧銮^{1,2}, 梁杉^{2,3}, 黎攀^{2,3}, 杜冰^{2,3*}

(1. 广东参之源健康科技有限公司, 广东广州 510000) (2. 官栈鱼胶营养安全研究中心, 广东广州 510642)
(3. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 该实验以秀丽隐杆线虫 (*Caenorhabditis elegans*) 为模型, 以红鲮鱼胶为原料, 探究红鲮鱼胶 (HMYJ)、即食花胶 (JSYJ) 及鱼胶复配物 (YJFP) 对秀丽隐杆线虫的寿命、运动能力、应激能力和体内抗氧化活性的影响。结果表明, 与空白对照组相比, HMYJ、JSYJ 及 YJFP 分别使线虫的寿命延长了 9.09%、9.09%、27.03%; JSYJ 和 YJFP 能促进线虫运动; HMYJ、JSYJ 及 YJFP 均能抵抗紫外应激和热应激的损伤。在紫外应激条件下, YJFP、JSYJ、HMYJ 使线虫存活率分别提高了 33.33%、22.22%、11.11%; 而在热应激条件下, YJFP、JSYJ、HMYJ 使线虫存活率都增大了 11.11%。此外, HMYJ、JSYJ 及 YJFP 干预后, 线虫体内过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和谷胱甘肽过氧化酶 (GSH-Px) 的活性显著提高 ($P<0.05$), 丙二醛 (MDA) 的含量显著降低 ($P<0.05$), 其中 JSYJ 样品组降低了 43.20%, HMYJ 样品组降低了 30.80%, YJFP 样品组降低了 22.80%。综上, HMYJ、JSYJ 及 YJFP 可通过延长线虫寿命, 提升其运动能力, 提高线虫抗应激损伤的能力及体内抗氧化酶的活性来减缓线虫衰老, 该研究也为鱼胶的开发利用提供了理论基础。

关键词: 鱼胶; 秀丽隐杆线虫; 抗衰老

文章编号: 1673-9078(2023)03-37-44

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.3.0430

In Vivo Anti-aging Effect of Red Slate Cod Croaker Isinglass on *Caenorhabditis elegans*

TIAN Jianxin^{1,2}, ZHONG Biluan^{1,2}, LIANG Shan^{2,3}, LI Pan^{2,3}, DU Bing^{2,3*}

(1. Guangdong Shenzhiyuan Health Technology Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

(2. SCAU and Guanzhan Fish Maw Nutrition and Security Research Center, Guangzhou 510642, China)

(3. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In this experiment, *Caenorhabditis elegans* was used as a model, and red slate cod croaker isinglass was used as the raw material. The effects of red slate cod croaker isinglass (HMYJ), ready-to-eat croaker gelatin (JSYJ) and their compound product (YJFP) on the life span, exercise capacity, stress capacity and antioxidant activity of *Caenorhabditis elegans*. The results showed that HMYJ, JSYJ and YJFP prolong the life span of nematodes by 9.09%, 9.09% and 27.03%, respectively, compared with the blank control group. JSYJ and YJFP could promote nematode's motility. HMYJ, JSYJ and YJFP could resist the damage of ultraviolet stress and heat stress. Under ultraviolet stress, YJFP, JSYJ and HMYJ increased the survival rate of nematodes by 33.33%, 22.22% and 11.11%, respectively. YJFP, JSYJ and HMYJ increased the survival rate of nematodes by 11.11% under heat stress. In addition, after HMYJ, JSYJ and YJFP intervention, the activities of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD) and glutathione peroxidase (GSH-Px) increased significantly ($P<0.05$), and the content of malondialdehyde (MDA) decreased significantly ($P<0.05$), with the JSYJ group decreasing by 43.20%, the HMYJ group decreasing by 30.80%, YJFP sample decreasing by 22.80%. In conclusion, HMYJ, JSYJ and YJFP can prolong the life span of nematodes, improve their locomotion ability, improve the abilities

引文格式:

田秉昕, 钟碧銮, 梁杉, 等. 红鲮鱼胶对秀丽隐杆线虫的体内抗衰老作用[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 37-44.

TIAN Jianxin, ZHONG Biluan, LIANG Shan, et al. *In vivo* anti-aging effect of red slate cod croaker isinglass on *Caenorhabditis elegans* [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 37-44.

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-21)

作者简介: 田秉昕 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品开发与研究, E-mail: tianjianxin9@126.com

通讯作者: 杜冰 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能性原料的研究及评价, E-mail: gzdubing@163.com

of nematodes to resist stress injury and the *in vivo* activities of antioxidant enzymes to slow down the aging of nematodes. This study also provides a theoretical basis for the development and utilization of Isinglass.

Key words: isinglass; *Caenorhabditis elegans*; anti-aging

衰老是机体各种组织和器官功能随着时间的推移逐渐退化的过程^[1]。伴随着衰老的发生,许多慢性疾病如阿尔茨海默病、糖尿病、高血压等相继出现^[2]。大量研究表明,与衰老有关的疾病和细胞程序性死亡主要由氧化应激引起,随着寿命的增加,机体在多种内部和外部因素的影响下,体内积累了大量自由基,使机体发生氧化应激,导致机体内蛋白质氧化、脂质过氧化和 DNA 损伤,最终加速机体衰老进程^[3-6]。研究发现,天然活性物质具有较强的抗氧化活性,可以提高机体内的抗氧化能力,减少氧化损伤,并通过控制衰老过程中重要基因的表达和相关途径的相互作用来延缓衰老^[7,8]。因此,开发高效且毒副作用小的天然活性物质将成为抗衰老食品研究的趋势。

鱼胶又称花胶、鱼鳔等,是新鲜的鱼鳔经过剖开,除去血管及表面的黏膜等杂质,清洗,压扁定型并干制后制得的成品^[9,10]。鱼胶中蛋白质含量丰富,氨基酸种类齐全,具备多种人体必需氨基酸,其中呈味氨基酸含量较高,从而赋予了鱼胶良好的风味,使其味道更加鲜美^[11]。清朝时期,鱼胶与燕窝、鱼翅齐名,是“海洋八珍”之一,素有“海洋人参”之美誉,是自古以来中医养生的滋补上品^[12,13]。鱼胶具有提高免疫力^[14]、降糖降脂^[12]、抗疲劳^[15]、防止皮肤老化^[12]等功效。目前国内外对鱼鳔的研究主要集中在营养成分分析、利用胶原蛋白制备活性肽及抗氧化活性评价上,对其抗衰老功效的研究还鲜有报道,如段振华等^[16]分析了不同来源鱼鳔的营养成分;涂宗财等^[17]发现酶解鱼鳔胶原蛋白制备的抗氧化活性肽在最优工艺条件下,对 DPPH 自由基清除能力达 79.98%;李娜等^[18]研究表明鳕鱼鳔胶原肽能缓解 H₂O₂ 诱导所造成的早期衰老,在一定程度上降低氧化损伤。此外,传统的鱼胶大都来自石首鱼,对鳕鱼胶的研究还较少,主要是将其制成即食花胶^[11]。因此本文主要以深海红鳕鱼鱼胶为原料,探究不同生产加工处理状态下鱼胶的抗衰老功效。

秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*, *C. elegans*)由于其生命周期短、繁殖能力强,并且有 60%~80% 的基因与人类相关基因具有高度保守性,故成为生物医药领域应用广泛的生物模型^[19-21]。Vayndorf 等^[22]以秀丽隐杆线虫为模型,研究全苹果提取物对线虫寿命和体内抗胁迫能力的影响发现,用苹果提取物处理线虫后,线虫的平均寿命和最大寿命均显著增加,且具有剂量依赖性。本实验以秀丽隐杆线虫为模型,探究不

同鱼胶样品对秀丽隐杆线虫的寿命、运动能力、应激水平和体内抗氧化酶活性的影响,从而评价不同加工状态下鱼胶的抗衰老效果,为鱼胶的深入开发利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红鳕鱼胶(干制花胶)、即食鱼胶(模拟即食花胶,以红鳕鱼胶为原料经过二次泡发制得)、鱼胶复配物(以红枣、牛奶和鱼胶复配而得),广东参之源健康科技有限公司;N2 野生型秀丽隐杆线虫(*C. elegans*, the Bristol Strain N2),美国 *Caenorhabditis elegans* Genetics Center;大肠埃希氏菌 OP50 (*E. coli* OP50),华南农业大学食品学院 106 实验室提供;琼脂、胰蛋白胨、链霉素硫酸盐、氯化钠(NaCl)、氯化钙(CaCl₂)、硫酸镁(MgSO₄)、磷酸氢二钠(Na₂HPO₄)、磷酸氢二钾(K₂HPO₄)、磷酸缓冲溶液,均为分析纯,广州齐湘生物科技有限公司;丙二醛(Malondialdehyde, MDA)试剂盒、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione, GSH-Px)试剂盒、过氧化氢酶(Catalase, CAT)试剂盒、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)试剂盒,南京城建生物工程研究所。

M9 缓冲溶液: 3 g Na₂HPO₄、1.5 g KH₂PO₄、2.5 g NaCl、0.125 g MgSO₄·7H₂O,加水至 500 mL,121 °C 灭菌 15 min,宜现配现用。

1.2 仪器与设备

PL203 万分之一天平,上海舍岩仪器有限公司;YB-300 中药粉碎机、LS-75HD 高压灭菌锅、SPX-160B-2 恒温生化培养箱,甘易仪器设备(上海)有限公司;Varioskan TM LUX 多功能酶标仪,美谷分子仪器(上海)有限公司;MZ101 体视显微镜,广州市明光电技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

红鳕鱼胶(HMYJ):将干制的红鳕鱼粉碎研磨,于-20 °C 的冰箱中保存备用。

即食鱼胶(JSYJ):模拟即食花胶,将干制花胶浸泡于 4~10 °C 的水中,泡发 26 h,清除杂质后将干净的

花胶再浸泡于 4~10 °C 的水中, 二次泡发 22 h, 高温灭菌, 最后冻干、粉碎, 得到模拟的即食鱼胶, 于 -20 °C 的冰箱中保存备用。

鱼胶复配物 (YJFP): 以红枣、牛奶和鱼胶按 1:2:2 复配, 然后冻干、粉碎, 得到鱼胶复配物, 于 -20 °C 的冰箱中保存备用。

1.3.2 基于秀丽隐杆线虫的鱼胶抗衰老评价

1.3.2.1 线虫的培养及传代

成年的秀丽隐杆线虫分为雌雄同体和雄性两种性别, 传代时挑取处于产卵期的单个雌雄同体的线虫放置在涂有大肠杆菌 OP50 的线虫生长培养基 (Nematode Growth Medium, NGM) 上, 在 20 °C 的生化培养箱中恒温培养^[23]。

1.3.2.2 线虫同期化

采用高氯酸钠漂白法对秀丽隐杆线虫进行同期化培养^[24]。由于年轻成虫体内有较多虫卵, 所以用 1 mL M9 缓冲溶液将年轻成虫冲洗至 2 mL 无菌 EP 管中, 加入 1 mL 裂解液裂解线虫, 震荡 5~10 min 后, 在低速离心机 (3 000 r/min) 上离心 1 min, 除去上清液, 再用 1 mL M9 缓冲溶液冲洗 2~3 次, 离心, 弃上清液, 余下 0.3~0.4 mL 后混匀缓冲液和虫卵, 用移液枪吸取 EP 管底部的线虫滴于 NGM 无菌区, 约 48 h 后虫卵基本发育成 L4 期成虫, 即完成同期化操作。

1.3.2.3 线虫寿命测定

将线虫分为空白对照组 (NC) 和 3 个样品组 (HMYJ、JSYJ、YJFP), 其中样品组分别将 25 mg/mL HMYJ、JSYJ、YJFP 样品过滤除菌后, 与大肠杆菌 OP50 菌液混匀, 涂布于 NGM 平板上供线虫食用, 每组设 3 个平行, 每个培养皿上放 20 条线虫, 于 20 °C 培养。挑取同期化的 L4 期成虫到各组培养皿上, 时间记为第 0 天, 前 5 天需每天将秀丽隐杆线虫转移至新的培养皿上培养, 每日观察线虫存活情况, 记录线虫生存和死亡条数, 5 d 后, 可隔日将线虫转移到新的培养皿上并记录线虫生存和死亡条数, 直至所有组线虫全部死亡 (当线虫无运动且经铂丝金刺激 10 s 后无反应视为死亡)^[25,26]。

1.3.2.4 线虫生殖能力测定

线虫分为空白对照组 (NC) 和 3 个样品组 (HMYJ、JSYJ、YJFP), 每组挑取 2 条线虫单独培养, 每隔 24 h 后将线虫转至新的线虫培养基上, 直至生殖能力丧失, 将转移的线虫继续于 20 °C 培养箱孵育 24 h, 每天记录线虫的产卵情况, 计算所有转移线虫生长培养基上的产卵量并除以 2, 即可得到每条线虫的产卵量^[27]。

1.3.2.5 线虫运动能力测定

线虫的运动能力测定参考 Herndon 等^[28]和 Yang 等^[29]的测定方法, 用铂丝针轻触线虫身体, 若 30 s 内

线虫表现出连续协调的正弦运动, 则记为快速运动; 反之则记为缓慢运动。运动水平分为三个水平: 线虫自发且平稳地移动, 标记为 A; 线虫在刺激后以非正弦轨迹移动, 标记为 B; 线虫没有向前移动, 但可以通过摆动头部或尾巴对触摸作出反应, 标记为 C。

1.3.2.6 线虫脂褐质积累测定

将同期化后的线虫培养至 L4 期后, 设置空白对照组, 并用样品干预 7 d, 然后固定在琼脂糖垫片上, 用盐酸四咪唑麻醉后用荧光显微镜 (激发波长: 365 nm, 发射波长: 420 nm) 观察线虫肠道的自发荧光^[30]。

1.3.2.7 线虫热应激实验

将同期化后的线虫培养至 L4 期后, 分别以不同浓度的样品干预 5 d, 随即转移到 37 °C 环境中继续培养 12 h 后, 在倒置荧光显微镜下计算线虫每小时的生存数和死亡数, 绘制生存曲线, 直至所有线虫全部死亡。

1.3.2.8 线虫紫外应激测定

将同期化后的线虫培养至 L4 期后, 分别以不同浓度的样品干预 5 d, 随即转移到紫外照射环境中培养 12 h 后, 在倒置显微镜下跟踪计算线虫的生存和死亡数, 绘制生长曲线, 直至所有线虫全部死亡。

1.3.2.9 线虫体内抗氧化活性测定

同期化后的线虫生长到 L4 期后, 将各组线虫转移到 NGM 培养基上, 用 M9 缓冲液将线虫冲洗至离心管中, 离心, 去除上清液, 加入 0.50 mL M9 缓冲液重悬线虫, 冷冻研磨后离心, 取上清液, 再分别用 SOD、CAT、MDA、GSH-Px 酶活力试剂盒检测酶活力^[31]。

1.4 数据统计与分析

实验均重复 3 次, 实验结果均用平均值±标准差表示; 采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析并用 *t* 检验进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著; 其中, 生存曲线使用 GraphPad (Windows 5.00 版) 软件进行 log-rank 检验分析显著性。

2 结果与分析

2.1 鱼胶对秀丽隐杆线虫寿命的影响

不同鱼胶样品对秀丽隐杆线虫生命周期的影响结果如图 1 所示, 与 NC 相比, 用不同的鱼胶样品饲喂线虫后, 均能使线虫的生存曲线右移。其中 NC 线虫平均寿命为 22 d, JSYJ 和 YJFP 样品组线虫平均寿命为 24 d, 而 HMYJ 样品组线虫平均寿命为 28 d, 寿命延长了 27.30%, 寿命延长的效果最佳。结果表明三种鱼胶样品均能延长线虫寿命, 减缓线虫衰老, 其中 HMYJ 减缓线虫衰老的效果更好。

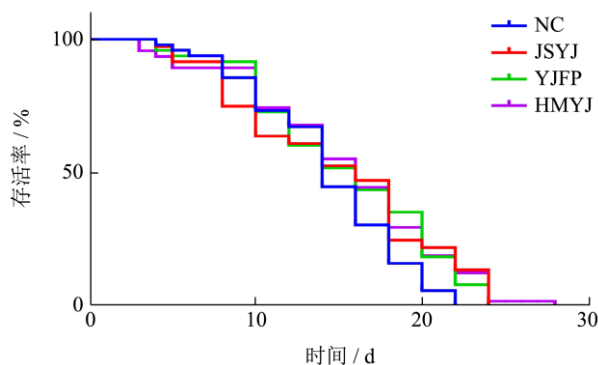


图1 鱼胶对线虫寿命的影响

Fig.1 Effect of isinglass on lifespan of nematodes

2.2 鱼胶对秀丽隐杆线虫生殖能力的影响

线虫产卵量与线虫的生殖能力直接相关，而线虫寿命与生殖能力之间存在“利弊权衡”，即寿命的延长往往以降低或丧失生殖能力为代价^[32]。如图2所示，空白对照组和不同鱼胶样品组的线虫生殖高峰期主要集中在前2天，鱼胶样品组的线虫产卵量略微高于空白对照组，但无显著差异。结果表明，用HMYJ、JSYJ、YJFP三种样品饲喂线虫后同NC一样，不会对线虫的生殖能力产生毒害作用^[33]。

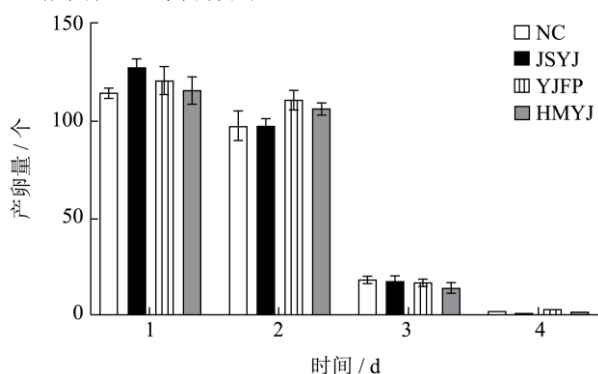


图2 鱼胶对线虫产卵量的影响

Fig.2 Effect of isinglass on oviposition quantity of nematodes

2.3 鱼胶对秀丽隐杆线虫运动能力的影响

衰老会引起线虫肌肉功能退化，导致其运动能力能力随着年龄的增加而下降，比如老化后的线虫运动能力下降，表现为运动缓慢或者不运动^[34]。因此线虫的运动能力可直观反应出线虫肌肉功能状态，是评价线虫寿命周期及衰老进展程度的重要生理指标之一^[33]。线虫的运动能力可通过线虫的弯曲方式及运动轨迹是否保持平滑的峰形、频率以及幅度等来判断，正常线虫的运行轨迹为正弦曲线，而非正弦曲线则表明线虫的运动平衡失调^[35]。不同鱼胶干预下，线虫的运动能力如图3所示，当线虫处于生命早期阶段（第4天），空白对照组和鱼胶样品组均有90.00%左右的线虫均能自发运动，不需要

触碰刺激；第8天，与NC相比，HMYJ样品组A状态的线虫数显著减少，B状态的线虫数显著增加；第16天，空白对照组和三种鱼胶样品组的线虫几乎全部处于B状态；第18~22天，各组又再次出现A状态下的线虫数，推测可能是由于在触碰线虫身体时，触碰刺激的强度不一致所产生的影响^[36]。从整体结果来看，不同生命阶段中，JSYJ和YJFP处于A状态下的线虫数较多，而HMYJ在B状态下的线虫数显著大于NC，大于JSYJ和YJFP，表明HMYJ不利于线虫运动，而JSYJ和YJFP能够促进线虫运动，但其促进作用较NC差异不显著。

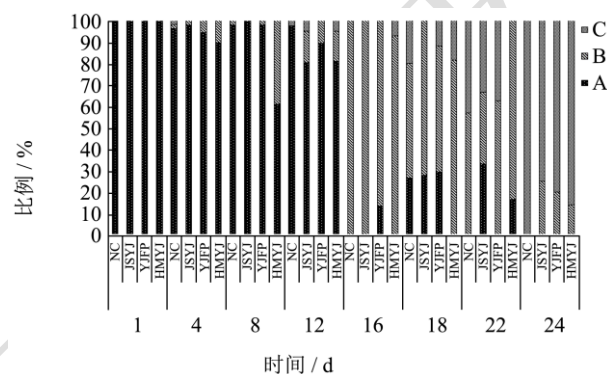


图3 鱼胶对线虫运动能力的影响

Fig.3 Effect of isinglass on motility of nematodes

注：A线虫自发且平稳地移动；B线虫做非正弦轨迹移动；C线虫摆动头部或尾巴。

2.4 鱼胶对秀丽隐杆线虫体内脂褐素的影响

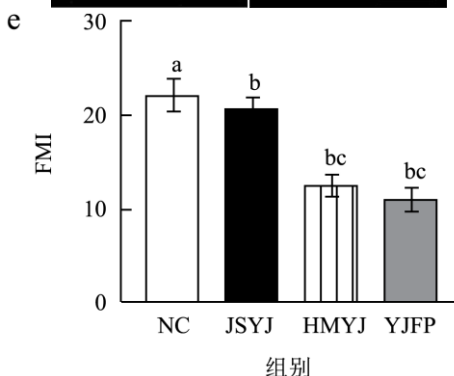
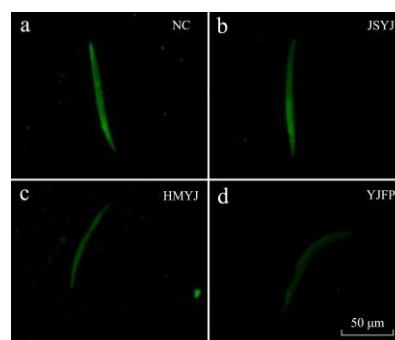


图4 鱼胶对线虫体内脂褐素含量的影响

Fig.4 Effects of isinglass on lipofuscin content in nematodes

注：不同小写字母表示0.05水平差异显著。

线虫体内的脂褐素含量是线虫生存状态的一个重要参考依据。随着线虫衰老，体内积累了大量的自由基，这些自由基极不稳定，容易与机体内其它物质发生反应而生成新的自由基，尤其是氧自由基和羟自由基，过量的氧自由基和羟自由基氧化细胞膜中不饱和脂肪酸，引起脂质过氧化、交联、聚合成脂褐素，它堆积在细胞内毒害细胞，导致细胞凋亡^[37]。吖啶橙可以与凋亡细胞的DNA相结合，在蓝色激发光下，凋亡细胞形成致密浓染的黄绿色荧光或黄绿色碎片颗粒^[38]，因此可以通过荧光强度来判断线虫体内细胞凋亡程度，进一步表明线虫体内的脂褐质含量。如图4所示，与NC相比，JSYJ荧光强度弱，但无显著差异，表明线虫体内的脂褐素含量相差不大，而HMYJ和YJFP的荧光强度较NC和JSYJ明显较弱，其脂褐素含量较NC和JSYJ显著降低 ($P < 0.05$)，表明HMYJ和YJFP能够减缓线虫衰老。

2.5 鱼胶对秀丽隐杆线虫应激的影响

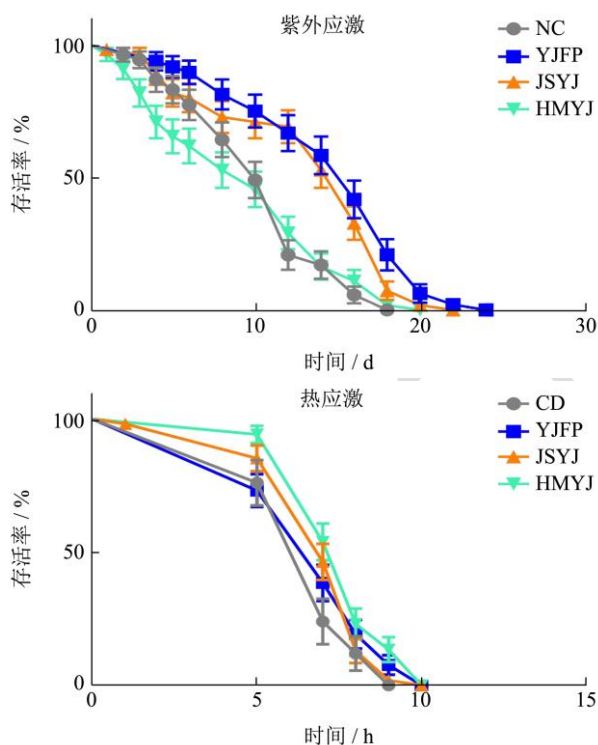


图5 鱼胶对线虫的应激反应

Fig.5 Stress response of isinglass to nematodes

机体抵抗环境（如紫外照射和高温）的能力增强，对于潜在的促进健康作用至关重要^[39,40]。机体遭受外界有害刺激时，其体内的活性氧自由基逐渐积累，导致脂质发生氧化反应，进而破坏细胞大分子，缩短寿命，因此，机体寿命的延长通常与其抵抗外界刺激的能力有关^[41-43]。如图5和表1所示，在紫外应激实验中，YJFP和JSYJ的曲线明显向右移动，线虫存活率显著

增加，与NC相比，YJFP和JSYJ的存活时间分别达到24 d和22 d，存活率分别提高了33.33%和22.22%，而HMYJ在紫外照射下的存活率提高了11.11%，表明JSYJ和YJFP较HMYJ更能抵抗紫外应激对线虫造成的损伤；而当线虫处于热应激状态下，与NC相比，YJFP、JSYJ、HMYJ的存活时间都为10 h，存活率都增大了11.11%，表明三种鱼胶样品均具有抵抗热应激的潜力，且抵抗热应激损伤的能力基本相等。

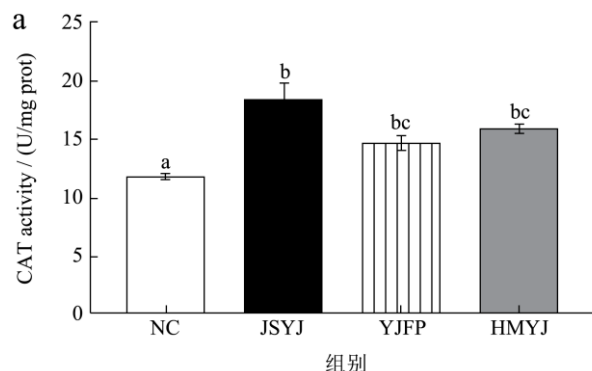
表1 鱼胶对线虫抗应激能力的影响

Table 1 Effect of Isinglass on the anti-stress ability of nematodes

	NC	YJFP	JSYJ	HMYJ
紫外应激/d	18	24	22	20
热应激/h	9	10	10	10

2.6 鱼胶对秀丽隐杆线虫体内抗氧化酶的影响

活性氧自由基是引起衰老最重要的因素之一，活性氧（ROS）的过量堆积不仅会导致脂质过氧化，蛋白质的破坏，还会引起氧化应激，加速衰老^[44]。机体内超氧化物歧化酶（SOD）和过氧化氢酶（CAT）是作为线虫体内主要的抗氧化酶，可清除体内过量的自由基，达到抗衰老的作用，常作为表现秀丽线虫衰老模型抗氧化能力的重要指标，其酶活力的升高标志着线虫抗氧化能力的增加，延缓衰老的能力增强^[45-47]；丙二醛（MDA）是脂质过氧化产物，其含量的高低能够反映出机体自由基的含量，间接反映出细胞衰老的程度，因此可作为衰老重要的标志^[48]；GSH-Px参与体内GSH催化反应，清除机体内过量的氧自由基，是衡量抗氧化能力大小的重要因素之一^[49]。秀丽隐杆线虫经过三种鱼胶样品干预后，其体内抗氧化指标检测的结果如图6所示，与NC相比，三种鱼胶样品组线虫体内SOD、CAT和GSH-Px活性均显著提高 ($P < 0.05$)，MDA含量均显著下降 ($P < 0.05$)，其中JSYJ降低了43.20%，HMYJ降低了30.80%，YJFP降低了22.80%。综上所述，三种鱼胶样品均能通过提高线虫体内抗氧化酶活性及降低MDA含量来延缓线虫衰老。



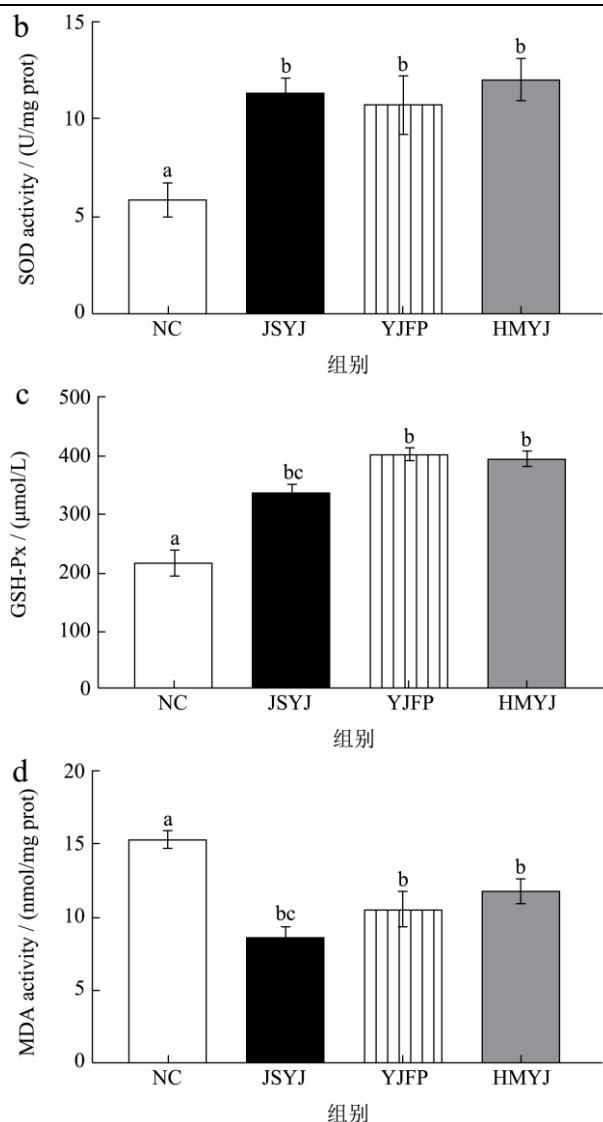


图6 鱼胶体内抗氧化指标的测定

Fig.6 Determination of antioxidant indexes in isinglass

注: a 过氧化氢酶活性; b 超氧化物歧化酶活性; c 谷胱甘肽过氧化酶活性; d 丙二醛含量; 不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。

3 结论

本文以秀丽隐杆线虫为模型,评价了红鲮鱼胶(HMYJ)、即食鱼胶(JSYJ)、鱼胶复配物(YJFP)3种鱼胶样品延缓线虫衰老的作用,并对其可能的作用机制进行了初步探索。结果表明,HMYJ、JSYJ、YJFP均能延长线虫寿命,其中HMYJ处理后,线虫的寿命延长了27.30%;线虫运动实验中,YJFP促进线虫运动的效果优于HMYJ和JSYJ,同时HMYJ和YJFP均能降低线虫体内的脂褐素含量;HMYJ、JSYJ及YJFP均不会对线虫的生殖能力产生毒害作用,并能抵抗紫外应激和热应激的损伤。在紫外应激条件下,YJFP、JSYJ、HMYJ使线虫的存活率分别提高了33.33%、22.22%和

11.11%;在热应激条件下,经HMYJ、JSYJ、YJFP干预后,线虫的存活率都提高了11.11%。此外,在线虫体内抗氧化实验中,HMYJ、JSYJ、YJFP均显著提高了线虫体内过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化酶(GSH-Px)的活性,并使线虫体内丙二醛(MDA)的含量分别降低了30.80%、43.20%、22.80%。综上所述,以红鲮鱼胶为原料制备的三种鱼胶样品均能延缓秀丽隐杆线虫衰老,进一步说明,红鲮鱼胶具有延缓线虫衰老的作用,其作用机制可能是通过提高线虫体内的抗氧化酶活性来减轻氧化损伤,减缓线虫衰老。该研究也为鱼胶的开发利用及在抗衰老方面的研究提供了理论基础。

参考文献

- [1] 姜平,黎健.血管衰老及其机制[J].生物化学与生物物理进展,2014,41(3):295-304.
- [2] Tchkonias Tamar, Kirkland L Janmes. Aging, cell senescence, and chronic disease: emerging therapeutic strategies [J]. JAMA, 2018, 320(13): 1319-1320.
- [3] LUO Jiao, Mills Kevin, Cessie Saskia Le, et al. Ageing, age-related diseases and oxidative stress: What to do next? [J]. Ageing Research Reviews, 2019, 57: 100982.
- [4] GU Chenxi, WEN Yun, WU Lu, et al. Arsenite-induced transgenerational glycometabolism is associated with up-regulation of H3K4me2 via inhibiting spr-5 in *Caenorhabditis elegans* [J]. Toxicology Letters, 2020, 326: 11-17.
- [5] Preez G Du, Fourie H, Daneel M, et al. Oxygen consumption rate of *Caenorhabditis elegans* as a high-throughput endpoint of toxicity testing using the seahorse XFe96 extracellular flux analyzer [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-11.
- [6] 王洪磊,仇银霞,王昀博,等.运动与自由基代谢的发展现状研究[J].四川体育科学,2018,37(3):32-35.
- [7] 王力,肖媚方,刘斌,等.海洋生物活性物质抗衰老作用研究进展[J].食品工业科技,2021,42(22):433-441.
- [8] 何晨,刘晶晶,陈楠,等.抗衰老药物的研究进展[J].西北药学杂志,2020,35(1):154-157.
- [9] 段振华,殷安齐,贾巧利,等.海鱼鱼鳔资源利用研究[J].食品研究与开发,2006,1:136-137.
- [10] 彭继烽,林晓君,郑剑红,等.基于DNA条形码的鱼胶鉴别技术的研究[J].汕头大学医学院学报,2018,31(4):201-205.
- [11] 章丽莉,谢润筹,陈永东,等.食用鱼胶的制备和功效研究[J].海洋与渔业,2017,6:76-77.
- [12] 屈义.鱼鳔糖胺聚糖的提取分离、结构表征及活性评价[D].湛江:广东海洋大学,2018.

- [13] 段振华.鱼鳔加工应用的研究进展[J].中国食物与营养,2009,6:34-36.
- [14] 周沫希,来梦婕,薛凡,等.墨西哥黄唇鱼鱼鳔胶抗疲劳作用的动物试验研究[J].中国海洋药物,2018,37(4):31-38.
- [15] 段振华,汪菊兰,殷安齐,等.几种鱼鳔的营养成分分析与评价[J].食品研究与开发,2007,10:62-65.
- [16] 涂宗财,唐平平,郑婷婷,等.响应面优化鱼鳔胶原肽制备工艺及其抗氧化活性研究[J].食品与发酵工业,2017,43(5):160-166.
- [17] 李娜,马玉洁,刘楠,等.鳕鱼鳔胶原肽对 H₂O₂ 诱导 2BS 细胞早期衰老的保护作用[J].中国食品学报,2021,21(10):101-107.
- [18] 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.
- [19] Nigon Marc Victor, Felix Anne Marine. History of research on *C. elegans* and other free-living nematodes as model organisms [J]. Wormbook, 2017: 81-84.
- [20] Watts Jennifer L, Ristow Michael. Lipid and carbohydrate metabolism in *Caenorhabditis elegans* [J]. Genetics, 2017, 207: 413-446.
- [21] Petersen Carola, Dirksen Philipp, Schulenburg Hinrich. Why we need more ecology for genetic models such as *C. elegans* [J]. Trends Genet, 2015, 31(3): 120-127.
- [22] Vayndorf Elena M, Lee Siu Sylvia, Liu Ruihai. Whole apple extracts increase lifespan, healthspan and resistance to stress in *Caenorhabditis elegans* [J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(3): 1235-1243.
- [23] 吕振宇,孟姣,孙传鑫,等.枸杞对秀丽隐杆线虫寿命和产卵的影响及其抗氧化作用[J].食品科学,2019,40(5):183-188.
- [24] Onken Brian, Driscoll Monica. Metformin induces a dietary restriction - like state and the oxidative stress response to extend *C. elegans* healthspan via AMPK, LKB1, and SKN-1 [J]. Plos One, 2010, 5(1): e8758.
- [25] LIN Chunxiu, ZHANG Xiaoying, XIAO Jie, et al. Effects on longevity extension and mechanism of action of carnosic acid in *Caenorhabditis elegans* [J]. Food & Function, 2019, 10(3): 1398-1410.
- [26] 林宇沛,李春燕,谷宁,等.低剂量阿托伐他汀钙对线虫寿命及相关指标的影响[J].海南医学,2020,31(23):3004-3008.
- [27] CHEN Yunjiao, ONKEN Brian, CHEN Hongzhang, et al. Mechanism of longevity extension of *Caenorhabditis elegans* induced by pentagalloyl glucose isolated from eucalyptus leaves [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(15): 3422-3431.
- [28] Hemdon Laura A, Schmeissner Peter J, Dudaronek Justyna M, et al. Stochastic and genetic factors influence tissue-specific decline in ageing *C. elegans* [J]. Nature, 2002, 419(6909): 808-814.
- [29] YANG Jie, WAN Qinli, MU Quanzhang, et al. The lifespan-promoting effect of otophyllolide B in *Caenorhabditis elegans* [J]. Natural Products and Bioprospecting, 2015, 5(4): 177-183.
- [30] 朱纯洁.低浓度离子液体对秀丽隐杆线虫的 Hormesis 效应及相关机理研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
- [31] 王高坚,王珍珍,李嘉嘉,等.蓝莓酵素的体外抗氧化及对秀丽隐杆线虫的氧化应激保护作用[J].食品工业科技,2021,42(15):343-350.
- [32] Gruber Jan, Tang Soon Yew, Halliwell Barry. Evidence for a trade-off between survival and fitness caused by resveratrol treatment of *Caenorhabditis elegans* [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2007, 1100(Apr): 530-542.
- [33] 蔡洁.米糠活性肽通过 daf-16 和 skn-1 调节线虫寿命与应激能力的研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
- [34] 刘静.金钗石斛总生物碱抗秀丽隐杆线虫衰老作用及其机制研究[D].遵义:遵义医科大学,2019.
- [35] 王艳菊.葡萄籽原花青素对秀丽隐杆线虫生命周期的影响[D].北京:北京林业大学,2014.
- [36] 黄子亮.秀丽隐杆线虫运动能力的衰减及其干预研究[D].广州:广东药科大学,2021.
- [37] 刘芝兰.自由基与衰老及延缓衰老药物干预[J].临床心身疾病杂志,2005,2:192-193.
- [38] 杜星芳,贾艳丽,韩紫薇,等.菜芙蓉多糖对秀丽隐杆线虫抗氧化作用的研究[J].河北科技大学学报,2022,43(3):308-318.
- [39] ZHANG Peichun, ZHAI Yunyi, Cregg James, et al. Stress resistance screen in a human primary cell line identifies small molecules that affect aging pathways and extend *C. elegans* lifespan [J]. G3 (Bethesda), 2020, 10(2): 849-862.
- [40] Johnson Thomas E, Cypser James R, Edouard De Castro, et al. Gerontogenes mediate health and longevity in nematodes through increasing resistance to environmental toxins and stressors [J]. Experimental Gerontology, 2000, 35(6-7): 687-694.
- [41] Etsuo Niki. Lipid peroxidation and its inhibition: overview and perspectives [J]. Journal of Oleo Science, 2001, 50(5): 313-320.
- [42] Canuelo Ana, Gilbert Lopez Bienvenida, Pacheco Linan Pedro, et al. Tyrosol, a main phenol present in extra virgin olive oil, increases lifespan and stress resistance in *Caenorhabditis elegans* [J]. Mechanisms of Ageing & Development, 2012, 133(8): 563-574.
- [43] 阎茹玉,吴宿慧,方亚影,等.原人参二醇延缓衰老及抗氧化应激作用的机制研究[J].中药药理与临床,2022,38(1):56-62.

- [44] WANG Chen, AN Jing, BAI Yingchen, et al. Tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate accelerated the aging process induced by the 4-hydroxynon-2-enal response to reactive oxidative species in *Caenorhabditis elegans* [J]. Environmental Pollution, 2018, 246(MAR.): 904-913.
- [45] Jorge Arturo Santos-López, Alba Garcimartín, María Elvir López-Oliva, et al. Chia oil-enriched restructured pork effects on oxidative and inflammatory status of aged rats fed high cholesterol/high fat diets [J]. Journal of Medicinal Food, 2017, 20(5): 526-534.
- [46] Ali Sameh Saad, Hardt Joshua I, Dugan Laura L. SOD activity of carboxyfullerenes predicts their neuroprotective efficacy: a structure-activity study [J]. Nanomedicine Nanotechnology Biology & Medicine, 2008, 4(4): 283-294.
- [47] Lafargue Audrey, Degorre Charlotte, Corre Isabelle, et al. Ionizing radiation induces long-term senescence in endothelial cells through mitochondrial respiratory complex II dysfunction and superoxide generation [J]. Free Radic Biol Med, 2017, 108: 750-759.
- [48] 丁玉琴,周红梅.二至丸延缓皮肤组织衰老的实验研究[J].河南中医,2005,25(10):3.
- [49] LI Hong, KANG Chenzhe, GUO Huanhuan et al. Anti-fatigue activity of a novel polysaccharide conjugates from Ziyang green tea [J]. International Journal of Biological Macromolecules Structure Function & Interactions, 2015, 80: 566-572.