

酸提海带多糖对秀丽隐杆线虫衰老的延缓作用

王艳英¹ 徐玫瑰¹ 赵培² 陈慧斌^{1,3} 黄鹭强^{1,3}

(1. 福建师范大学生命科学学院, 福建 福州 350117; 2. 福建上源生物科学技术有限公司, 福建 福州 350002;

3. 福建师范大学南方海洋研究院, 福建 福州 350117)

摘要: [目的] 研究海带多糖的抗衰老作用。[方法] 以海带为材料, 采用稀酸辅助提取法制备海带多糖。通过衰老秀丽隐杆线虫模型, 分析线虫体内脂褐素、活性氧、抗氧化能力及衰老相关基因表达的影响, 评估海带多糖对线虫寿命、运动和应激能力的影响。[结果] 与对照组相比, 不同质量浓度酸提海带多糖均能显著延长线虫的寿命, 增强线虫运动和应激能力, 明显降低线虫体内脂褐素、ROS 含量, 提高过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活力; 同时, 海带多糖能够激活 *skn-1*、*daf-2*、*age-1*、*akt-1*、*daf-16* mRNA 的表达, 上调其下游因子 mRNA 的表达, 延长线虫的寿命。[结论] 海带多糖能够通过增加线虫抗氧化能力和调节 IIS 信号通路来达到延长寿命的作用。

关键词: 海带; 多糖; 秀丽隐杆线虫; 衰老模型; 抗氧化

Anti-aging effects of acid-extracted *Laminaria japonica* polysaccharides on *Caenorhabditis elegans*

WANG Yanying¹ XU Meigui¹ ZHAO Pei² CHEN Huibin^{1,3} HUANG Luqiang^{1,3}

(1. College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China;

2. Fujian SunyBiotech Corporation, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Southern Institute of

Oceanography, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China)

Abstract: [Objective] To study the anti-aging effects of kelp (*Laminaria japonica*) polysaccharides. [Methods] Polysaccharide is obtained from kelp by acid-assisted extraction methods. Based on the aging model of *Caenorhabditis elegans*, the animal's lipofuscin, reactive oxygen species (ROS), antioxidant capacity, and aging-related gene expression are analyzed to evaluate the effects of kelp polysaccharides on their life span, motility, and stress resistance. [Results] Compared with the control group, acid-extracted kelp polysaccharides (AKP) with different mass concentrations improve the life span, mobility, and stress resistance of *C. elegans*. Specifically, AKP significantly reduces the lipofuscin content and ROS levels, while increasing the activities of catalase and superoxide dismutase. In addition, kelp polysaccharides extend the life span of *C. elegans* by activating the expression of *skn-1*, *daf-2*, *age-1*, *akt-1*, and *daf-16* mRNA, while up-regulating the expression of downstream factor mRNAs. [Conclusion] AKP can extend life span by increasing antioxidant capacity and regulating the insulin/insulin-like growth factor signaling pathway (IIS) of *C. elegans*.

Keywords: *Laminaria japonica*; polysaccharide; *Caenorhabditis elegans*; aging model; antioxidation

面对全球人口老龄化日益成为社会关注的焦点, 预防衰老、促进健康的功能性食品正逐步展现其独特价值^[1]。海洋植物多糖可通过调节机体免疫系统功能^[2]、抑

制氧化应激反应^[3]等生物学机制, 延缓细胞衰老。

海带 (*Laminaria japonica*) 为大型经济褐藻类^[4], 含有多糖、多不饱和脂肪酸、多肽以及甘露醇等活性成分^[5]。

基金项目: 福建省科技计划区域发展项目 (编号: 2024N3011)

通信作者: 黄鹭强 (1974—), 男, 福建师范大学教授, 博士。E-mail: biohlq@fjnu.edu.cn

赵培 (1984—), 女, 福建上源生物科学技术有限公司高级工程师, 博士。E-mail: zpfj@sunybiotech.com

收稿日期: 2024-11-19 **改回日期:** 2025-07-11

引用格式: 王艳英, 徐玫瑰, 赵培, 等. 酸提海带多糖对秀丽隐杆线虫衰老的延缓作用[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 135-142.

Citation: WANG Yanying, XU Meigui, ZHAO Pei, et al. Anti-aging effects of acid-extracted *Laminaria japonica* polysaccharides on *Caenorhabditis elegans*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 135-142.

海带多肽^[6]可通过调控 ASK22/MAPKs 通路来达到抑制肿瘤生长的目的。多糖为海带的主要活性成分^[7],具有抗凝血、抗氧化和免疫调节等作用^[8-9]。目前,海带多糖主要通过低浓度的酸提取制备,具有高超氧化物自由基和羟自由基清除活性^[10]。王猛等^[11]研究发现,褐藻多糖可以延缓寿命,提升秀丽隐杆线虫体内 SOD、CAT 等抗氧化酶活性。目前,有关海带多糖抗衰老功效的研究较少。

秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)是一种微小的、以细菌为食的非寄生性线虫^[12],被广泛应用于抗衰老物质的筛选及分子机制研究中^[13]。试验拟通过稀酸辅助提取法得到海带多糖,采用线虫作为衰老模型,研究酸提海带多糖对线虫寿命、生长发育能力、抗逆境能力的影响以及抗衰老机制,旨在为海带多糖作为功能性食品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与设备

海带(*Laminaria japonica*):盐渍品,福建天源水产食品有限公司;

大肠杆菌 OP50、秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*):实验室保存;

SOD、CAT 试剂盒:南京建成生物工程研究所;

RNA 提取试剂盒、反转录试剂盒、SYBR qPCR Master Mix 试剂盒:北京全式金生物技术有限公司;

其他化学试剂均为国产分析级;

冷冻干燥机:LG-12 型,宁波新芝设备有限公司;

梯度 PCR 扩增仪:ProFlex 型,Applied Biosystems 公司;

体视显微镜:Stemi 305 型,蔡司光学(中国)有限公司;

实时荧光定量 qPCR 系统:Quant Studio 3 型,赛默飞世尔科技公司;

微量紫外分光光度计:DS-11 型,美国 DeNovix 公司。

1.2 方法

1.2.1 海带前处理 盐渍海带经蒸馏水浸泡 4 h、流水清洗并沥干后,于 65℃干燥 4~6 h,研磨过 40 目筛;依次以乙醇、石油醚和丙酮回流 2 h 以去除色素与脂质,得脱色海带粉末。

1.2.2 酸提海带多糖(AKP)的制备 采用稀酸辅助提取法。称取脱色后的海带粉末于烧杯中,用柠檬酸将 pH 调至 2.0,70℃提取 6 h,调 pH 至 7.0,8 000 r/min 离心 15 min,取上清液经抽滤去除杂质,浓缩,醇沉。用丙酮、石油醚、无水乙醇再次清洗,除去脂质和色素等杂质。透

析,冻干,获得海带多糖,产率为 16.14%,采用苯酚硫酸法测得提取物中海带多糖含量为 75.78%。

1.2.3 单糖测定 称取(10.000±0.005) mg 海带多糖,加入 1 mL 2 mol/L 三氟乙酸溶液,121℃油浴 2 h,冷却至室温,氮气吹干,加入无水甲醇清洗,重复该步骤 3 次。加入无菌水溶解,过 0.22 μm 滤膜,转入进样瓶待测。将保留时间与单糖标准曲线相匹配,以确定海带多糖样品的单糖组成,根据衍生物的峰面积计算各组分的摩尔量。

采用 Dionex™ CarboPac™ PA20 (150 mm×3.0 mm, 10 μm)液相色谱柱,进样量 5 μL,流动相 A 为 H₂O,流动相 B 为 0.1 mol/L NaOH,流动相 C 为 0.1 mol/L NaOH 和 0.2 mol/L NaAc,流速 0.5 mL/min,柱温 30℃;洗脱程序:0 min, A 相、B 相、C 相体积比 95:5:0;26 min, A 相、B 相、C 相体积比为 85:5:10;42 min, A 相、B 相、C 相体积比为 85:5:10;42.1 min, A 相、B 相、C 相体积比为 60:0:40;52 min, A 相、B 相、C 相体积比为 60:40:0;52.1 min, A 相、B 相、C 相体积比为 95:5:0;60 min, A 相、B 相、C 相体积比为 95:5:0。

1.2.4 线虫培养与同步化 挑取线虫至生长培养基(NGM)上,NGM 中涂有 200 μL 大肠杆菌 OP50(菌数 1×10⁷ CFU/mL)作为线虫食物,于 20℃恒温培养箱中培养。采用次氯酸裂解法对线虫进行同步化^[14],获得线虫卵。

1.2.5 试验分组与给药 将海带多糖溶解至大肠杆菌 OP50 溶液(菌数 1×10⁷ CFU/mL)中,得到质量浓度为 0.5, 1.0, 2.0 mg/mL 的培养液。将同步化 L4 期线虫分别放置于等量涂布含有不同质量浓度(0.5, 1.0, 2.0 mg/mL)海带多糖菌液的 NGM 平板上,对照组线虫不含海带多糖。培养 72 h 后收集 L4 期线虫,用于后续试验。

1.2.6 线虫寿命测定 每组 3 个培养皿,每个培养皿 50 条线虫,20℃培养。为了阻止秀丽线虫产卵干扰试验,培养基中添加终浓度为 50 μmol/mL 的 FUDR 溶液^[15]。每天观察并记录线虫存活与死亡数量,直至线虫全部死亡。

1.2.7 运动能力、体长和体宽测定 采用 L4 时期的秀丽隐杆线虫,转到对照组和不同质量浓度(0.5, 1.0, 2.0 mg/mL)的海带多糖处理组中,培养 48 h 后,每组挑取 30 条,测定体长、体宽和身体弯曲运动频率。

1.2.8 咽泵频率测定 试验分组与给药同 1.2.7, 20℃给药 5, 10 d 后,每组随机挑取 30 条,每隔 30 s 记录头部咽泵末端球部的收缩次数,进行 3 次生物学重复。

1.2.9 脂褐素荧光测定 试验分组与给药同 1.2.7, 20℃给药 5, 10 d 后,每组挑取线虫置于含有琼脂糖凝胶的载玻片上,滴加 10 μL 左旋咪唑溶液麻痹虫体,盖上盖玻片,于荧光正置显微镜下观察并使用 Image J 软件分析荧光强度,每个处理记录 50 条线虫的数据,进行 3 次生物学重复。

1.2.10 氧化应激与耐热能力测定 试验分组与给药同1.2.7, 20℃给药5 d后,参照Wang等^[16]的方法将线虫移至40 mmol/mL百草枯溶液中处理2 h, 2 000 r/min离心1 min去除上清,用M9清洗3遍^[17];热应激则参照Chandler等^[18]的方法将线虫转移到新的NGM板中,20℃培养24 h,统计线虫死亡数量。每组检测120条线虫,3次生物学重复。

1.2.11 体内抗氧化活性测定 试验分组与给药同1.2.7, 20℃给药5 d后,每组收集3 000条线虫,清洗至匀浆管中,于冰上充分研磨,4℃、10 000 r/min离心5 min取上清液,按照超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)试剂盒说明书测定酶活力。

1.2.12 体内活性氧(ROS)荧光测定 试验分组与给药同1.2.7, 20℃给药5 d后,每组挑选50条线虫至1.5 mL EP管中,用M9缓冲液清洗残留的大肠杆菌3次,加入适量5 μg/mL H₂DCFDA^[19], 20℃避光孵育30 min, 10 mmol/L叠氮化钠麻醉线虫,于荧光正置显微镜下观察线虫体内ROS含量,并使用Image J软件分析荧光强度。

1.2.13 衰老相关基因表达水平测定 试验分组与给药同1.2.7, 20℃给药5 d后,每组收集3 000条线虫至匀浆管中, M9缓冲液清洗3次, 1 500 r/min离心1 min,用Trizol试剂提取线虫总RNA,通过逆转录合成cDNA;再以cDNA为模板,使用SYBR qPCR Master Mix试剂盒进行扩增反应,以β-actin为内参,于PCR仪中42℃保温60 min,结束后80℃保温5 min, 4℃保温10 min,共40个循环。每个样品设3个复孔,使用2^{-ΔΔCt}法进行相对定量处理,引物序列见表1。

1.3 统计分析

所有试验至少含有3次生物学重复,使用Graphpad Prism 8.0软件进行统计学分析作图,通过ANOVA方差分析和T test检验;P<0.05具有统计学意义,结果以平均值±标准差表示。

表1 相关引物序列

基因	上游引物
<i>daf-16</i>	F:GCGGAGCCAAGAAGAGGATA R:GACGGAAAGATGATGGAACG
<i>daf-2</i>	F:TCGAGCTCTCCTACGGTGT R:CATCTTGTCACCACGTGTC
<i>age-1</i>	F:TCCATCTGTGGGCTCCTGAACC R:CGCTGCGTTGGTGCCTATCC
<i>akt-1</i>	F:AACTCAGCGATTGGGTGGTG R:ACGTTGCTTCCCAATCGACA
<i>skn-1</i>	F:CAACGGATGATGGAGTATTT R:TGGTGGATGCTCGGTGAG
<i>sod-3</i>	F:TGGCTAAGGATGGTGGAGAA R:GCCTGAACCGCAATAGTGAT
<i>gst-4</i>	F:TTGATGCTCGTGCTCTTGCT R:GTCGTTGGCTTCAGCTTTGA
<i>act-1</i>	F:TCGGTATGGGACAGAAGGAC R:CATCCCAGTTGGTGACGAT

2 结果与分析

2.1 单糖组成

由图1可知,经对比计算可得多糖摩尔百分比分别为岩藻糖(Fuc) 5.41%、鼠李糖(Rha) 0.20%、半乳糖(Gal) 2.32%、葡萄糖(Glc) 0.68%、木糖(Xyl) 1.19%、甘露糖(Man) 1.85%、果糖(Fru) 2.20%、古罗糖醛酸(Gul-UA) 7.53%、葡萄糖醛酸(Glc-UA) 2.60%、甘露糖醛酸(Man-UA) 75.94%。海带多糖主要由甘露糖醛酸、古罗糖醛酸和岩藻糖组成,含有少量半乳糖、果糖和甘露糖,与Li等^[20-21]的研究结果类似。酸提取易产生有效的抗氧化效用多糖,在体外抗氧化活性中具有更高的自由基清除率^[22]。

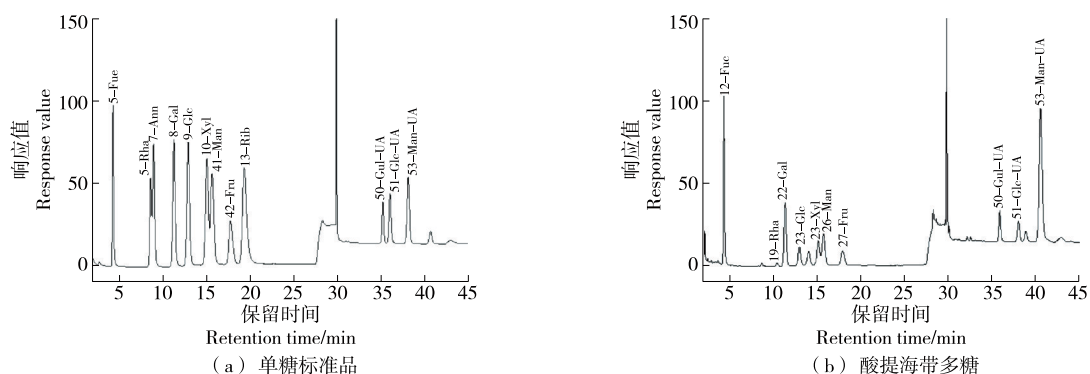


图1 单糖标准品和酸提海带多糖的离子色谱图

Figure 1 Ion chromatogram of monosaccharide standard and AKP

2.2 对线虫寿命的影响

由图 2 可知,与对照组相比,经不同质量浓度酸提海带多糖处理后线虫的生存曲线显著向右移动。由表 2 可知,海带多糖处理组(0.5,1.0,2.0 mg/mL)的寿命相对于对照组分别延长了 6.02%,23.69%,28.99%,最大中位数寿命相比对照组延长了 7 d。表明在一定质量浓度范围内,酸提海带多糖能显著延长线虫的寿命。

2.3 对线虫运动能力、体长和体宽的影响

线虫的运动能力体现在机体肌肉群的健康度,随着机体的衰老,其全身肌肉细胞会逐渐失去活力^[23]。由图 3

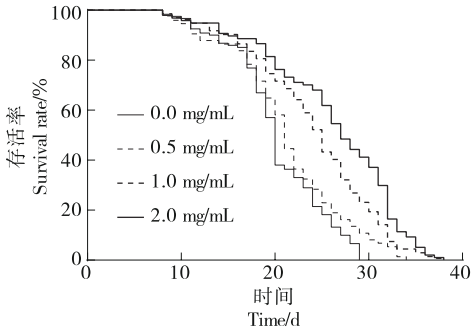


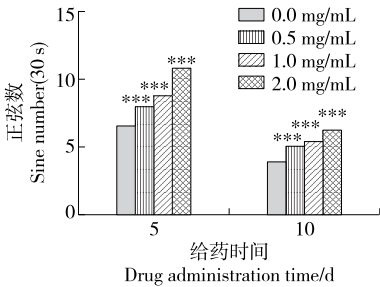
图 2 酸提海带多糖对线虫寿命的影响

Figure 2 Effects of AKP on *C. elegans* life span

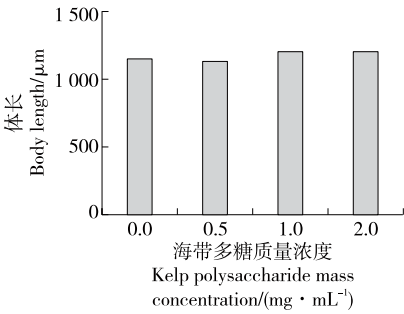
表 2 线虫寿命统计表

Table 2 Statistics of *C. elegans* life span

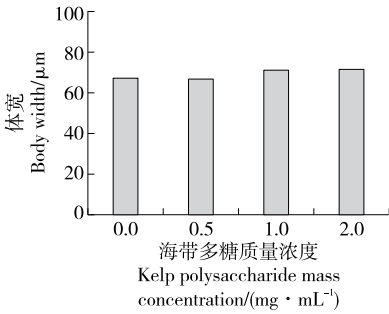
海带多糖质量浓度/(mg·mL ⁻¹)	最大寿命/d	平均寿命/d	中位寿命/d	百分比变化/%	与对照组 P 值对比
0.0	29	20.09±0.55	20		
0.5	34	21.29±0.67	21	6.02	<0.050
1.0	36	24.84±0.57	25	23.69	<0.001
2.0	38	25.91±0.78	27	28.99	<0.001



(a) 运动能力



(b) 体长



(c) 体宽

与对照组相比,***为 $P<0.001$

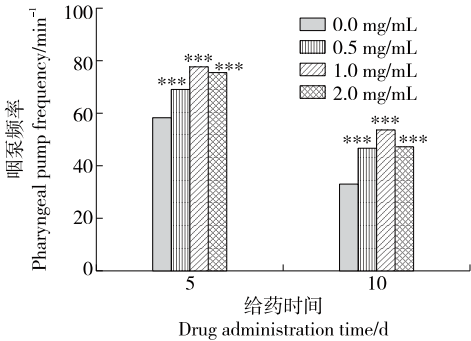
图 3 酸提海带多糖对线虫运动能力、体长和体宽的影响

Figure 3 Effects of AKP on mobility capacity, body length, and body width of *C. elegans*

可知,不同质量浓度酸提海带多糖对线虫的运动能力分别在第 5 天和第 10 天有显著改善($P<0.05$)。线虫体长、体宽会因食物和生长环境的不同而受到影响,可以作为衡量线虫生长发育状态的指标^[24]。与对照组相比,酸提海带多糖处理组对线虫的体长、体宽影响较小($P>0.05$),说明不同质量浓度酸提海带多糖对线虫的生长发育及运动能力均无影响。

2.4 对线虫吞咽频率的影响

Papaevgeniou 等^[25]研究表明,咽泵速率随着年龄的增长会降低。由图 4 可知,与对照组相比,海带多糖对年轻线虫和年老线虫的咽泵频率分别在第 5 天和第 10 天呈上升趋势($P<0.001$),说明酸提海带多糖对线虫的咽泵未产



与对照组相比,***为 $P<0.001$

图 4 酸提海带多糖对线虫吞咽频率的影响

Figure 4 Effects of AKP on pharyngeal pump frequency of *C. elegans*

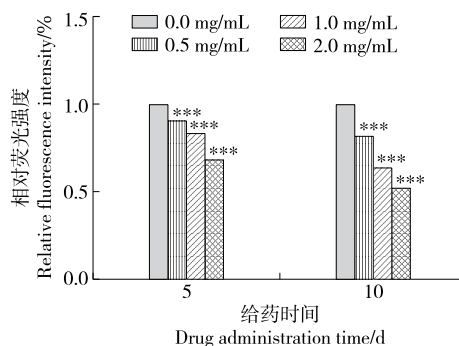
生负向作用,且不会影响线虫的摄食。

2.5 对线虫体内脂褐素荧光含量的影响

脂褐素作为衰老的一个标志性外显指标,也是线虫自发荧光的一部分^[26]。由图5可知,与对照组相比,培养5 d后,线虫体内的脂褐素荧光强度降低($P<0.001$);培养10 d后,线虫体内的荧光强度降低更明显($P<0.001$)。Li等^[27]研究表明,脂褐素的荧光强度随着线虫的衰老逐渐积累。因此,不同质量浓度酸提海带多糖均具有良好的抗衰老能力。

2.6 对线虫耐热性和急性氧化应激的影响

不利的环境条件可能导致线虫体内代谢失衡,进而加快其衰老过程,甚至引发死亡^[28]。由图6可知,相较于对照组,0.5,1.0,2.0 mg/mL 海带多糖处理组均提高了线虫对热应激的耐受性,死亡率分别降低了5.77%,9.27%,19.67%。相较于对照组,0.5,1.0,2.0 mg/mL 海带多糖处理组均提高了线虫的氧化应激能力,表明不同质量浓度酸提海带多糖均能增强线虫对逆环境的承受能力。



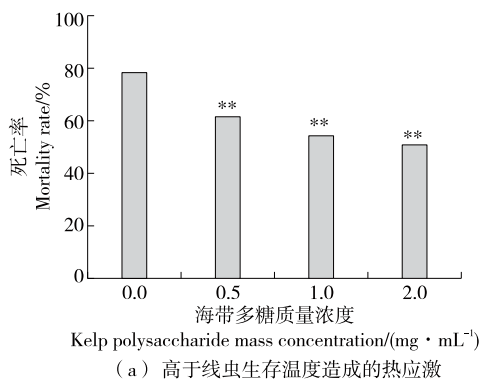
与对照组相比,***为 $P<0.001$

图5 酸提海带多糖对线虫脂褐素积累水平的影响

Figure 5 Effects of AKP on lipofuscin accumulation level of *C. elegans*

2.7 对线虫抗氧化酶活力的影响

当机体处于氧化应激状态时,抗氧化酶如SOD、CAT等水平会下降,细胞大分子易受到损伤^[29]。由图7可知,相较于对照组,不同质量浓度酸提海带多糖的SOD活力



与对照组相比,**为 $P<0.01$,***为 $P<0.001$

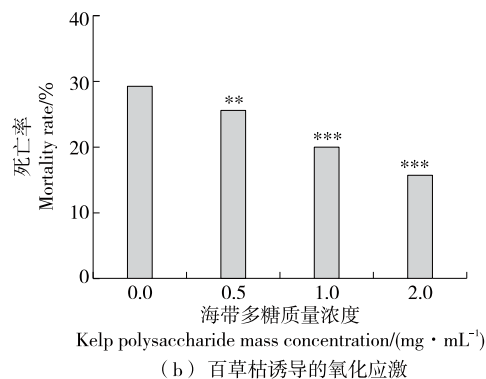
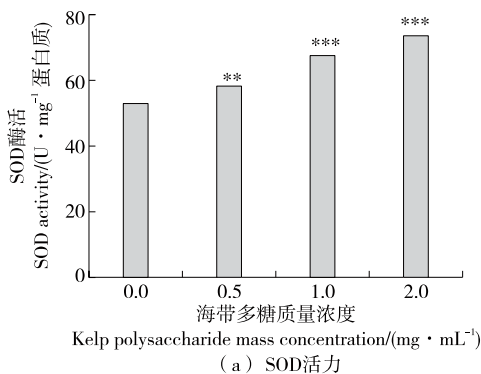


图6 酸提海带多糖对线虫抗逆境能力的影响

Figure 6 Effects of AKP on the stress resistance of *C. elegans*



与对照组相比,**为 $P<0.01$,***为 $P<0.001$

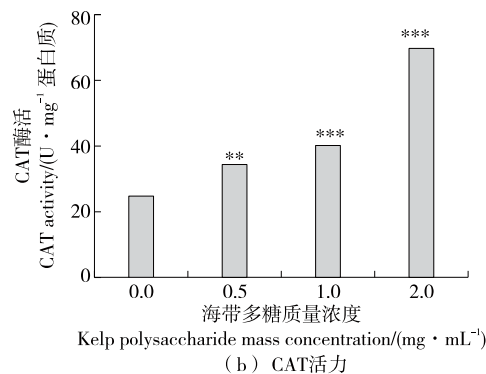


图7 酸提海带多糖对线虫体内抗氧化能力的影响

Figure 7 Effects of AKP on the antioxidant capacity in *C. elegans*

分别增加了 1.10, 1.27, 1.39 倍, CAT 活力分别增加了 1.37, 1.60, 2.77 倍。说明酸提海带多糖能提高 SOD、CAT 活力, 增强线虫抗氧化酶活力, 与 Ma 等^[30]的研究结果一致。

2.8 对线虫体内 ROS 水平的影响

ROS 是一种自由基, 在氧化应激和衰老条件下被激活, 其会损害脂质、蛋白质和 DNA 等大分子物质, 进而引发病理状况, 并促进衰老^[31]。由图 8 可知, 相较于对照组, 不同质量浓度酸提海带多糖的荧光强度分别降低了 19.29%, 26.77%, 52.84% ($P < 0.001$), 表明酸提海带多糖均能降低线虫的活性氧含量, 延长线虫寿命。

2.9 对线虫衰老相关基因表达的影响

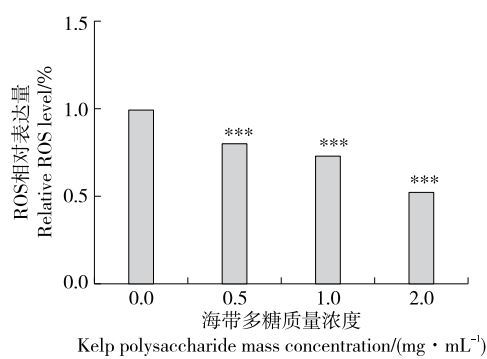
线虫寿命调控通路与胰岛素/胰岛素样信号传导途径 (IIS 途径) 和 *skn-1* 通路密切相关^[32-35]。*daf-2* 编码的酪氨酸激酶与人类胰岛素具有 30% 的序列相似性^[36], *age-1* 编码的磷脂酰肌醇 3-激酶 (PI3K) 与 *akt-1* 共同调控 *daf-16* 的转录活性。IIS 途径活性的下调会导致 *daf-16* 被 *akt-1* 磷酸化, 促使 *daf-16* 进入细胞核, 与靶基

因结合并启动其表达, 从而激活压力保护机制, 延长线虫寿命^[37]。

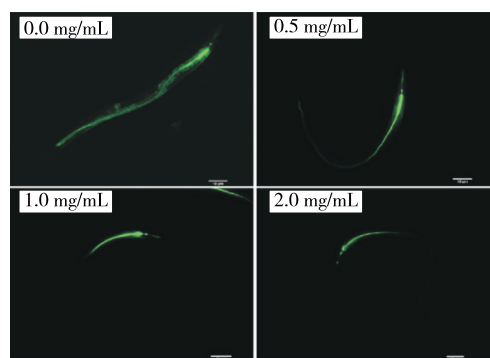
由图 9 可知, 与对照组相比, 海带多糖处理组的 *daf-2*、*age-1* 表达水平显著下降 ($P < 0.001$), *akt-1*、*daf-16* 显著上升 ($P < 0.001$)。 *sod-3*、*gst-4* 为下游靶基因, *sod-3* 主要受 *daf-16* 调控, *gst-4* 受 *skn-1* 和 *daf-16* 调控^[38], 是细胞内氧化应激标志物, 在细胞信号传导中起主要作用^[39]。海带多糖处理组的 *sod-3*、*gst-4* 表达水平显著上升 ($P < 0.001$), 与海带多糖对 SOD、CAT 活力的增强结果一致。 *skn-1*/Nrf-2 为调节细胞稳态和机体寿命的关键转录因子^[40], 对氧化应激具有一定的保护作用^[41], 海带多糖处理组的 *skn-1* 表达量显著升高, 与百草枯诱导的不同质量浓度海带多糖应激能力均提高相一致。综上, 海带多糖能够激活 *skn-1*、*daf-2*、*age-1*、*akt-1*、*daf-16* mRNA 的表达, 并上调其下游因子 mRNA 的表达, 延长线虫的寿命。

3 结论

研究制备的酸提海带多糖由甘露糖醛酸、古罗糖醛



(a) ROS 表达量

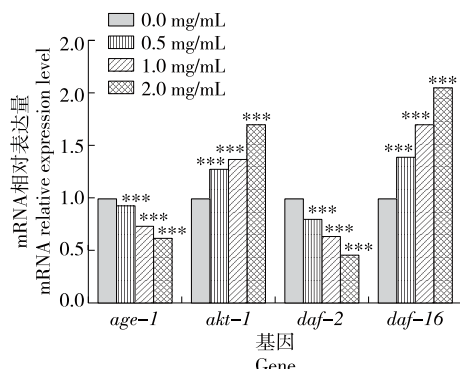


(b) 线虫的荧光采集图

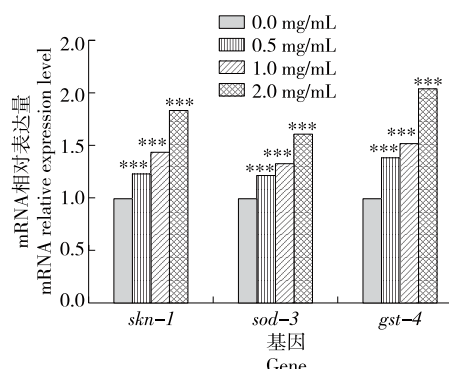
与对照组相比, ***为 $P < 0.001$

图 8 酸提海带多糖对线虫体内 ROS 积累的影响

Figure 8 Effects of AKP on ROS accumulation in *C. elegans*



(a) *age-1*、*akt-1*、*daf-2* 和 *daf-16* 表达水平



(b) *skn-1*、*sod-3* 和 *gst-4* 表达水平

与对照组相比, ***为 $P < 0.001$

图 9 酸提海带多糖对线虫体内衰老因子表达水平的影响

Figure 9 Effects of AKP on aging factor expression levels in *C. elegans*

酸和岩藻糖组成。利用秀丽隐杆线虫模型进行研究,结果表明,酸提海带多糖能够明显延长线虫寿命,增强其运动能力、抵抗高温以及氧化应激能力,降低体内脂褐素、活性氧积累造成的氧化损伤,显著提高过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活力;通过调节 *skn-1* 通路和胰岛素/胰岛素样信号传导途径(IIS途径)中的关键分子表达进而参与线虫衰老过程的调控。后续可研究海带多糖发挥功能活性及抗衰老功能活性的分子作用机制。

参考文献

- [1] AGHAJANPOUR M, NAZER M R, OBEIDAVI Z, et al. Functional foods and their role in cancer prevention and health promotion: a comprehensive review[J]. American Journal of Cancer Research, 2017, 7(4): 740-769.
- [2] RAHMAN A, REHMAN R, PIRVU D G, et al. Unlocking the therapeutic potential of marine collagen: a scientific exploration for delaying skin aging[J]. Marine Drugs, 2024, 22(4): 159.
- [3] ZHAO X, LI B F, XUE C H, et al. Effect of molecular weight on the antioxidant property of low molecular weight alginate from *Laminaria japonica*[J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(2): 295-300.
- [4] LAUKAITYTE S, RIERA R. The status of research and utilisation on the subtidal kelp along the Chilean coast: a literature review[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2022, 41(12): 7-17.
- [5] LI H Y, YI Y L, GUO S, et al. Isolation, structural characterization and bioactivities of polysaccharides from *Laminaria japonica*: a review[J]. Food Chem, 2022, 370: 131010.
- [6] CHEN H, WU Y, CHEN Y, et al. P-268 Seaweed *Laminaria japonica* peptides possess strong anti-liver cancer effects[J]. Annals of Oncology, 2021, 32: S189.
- [7] OZAWA T, YAMAMOTO J, YAMAGISHI T, et al. Two fucoidans in the holdfast of cultivated *Laminaria japonica*[J]. Journal of Natural Medicines, 2006, 60(3): 236-239.
- [8] GUAN X, WANG F Y, ZHOU B Q, et al. The nutritional function of active polysaccharides from marine animals: a review[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103693.
- [9] 葛智超, 李燕, 施文正, 等. 裸藻多糖提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 186-191.
- GE Z C, LI Y, SHI W Z, et al. Optimization of the extraction process of polysaccharides from euglena and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 186-191.
- [10] HOU Y, WANG J, JIN W H, et al. Degradation of *Laminaria japonica* fucoidan by hydrogen peroxide and antioxidant activities of the degradation products of different molecular weights[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 153-159.
- [11] 王猛, 关思宇, 于杰, 等. 褐藻多糖的体外抗氧化活性及其延长秀丽隐杆线虫的寿命[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 1-9.
- WANG M, GUAN S Y, YU J, et al. In vitro antioxidant activity of fucoidan-containing sulfated polysaccharide and its prolongation of the lifespan of *Caenorhabditis elegans*[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 1-9.
- [12] POUPET C, CHASSARD C, NIVOLIEZ A, et al. *Caenorhabditis elegans*, a host to investigate the probiotic properties of beneficial microorganisms[J]. Frontiers in Nutrition, 2020, 7: 135.
- [13] 陈旺, 何海伦, 郑艳君, 等. 秀丽隐杆线虫在食品营养功能评价中的研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 197-203.
- CHEN W, HE H L, ZHENG Y J, et al. Review of *Caenorhabditis elegans* in food nutritional function evaluation[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 197-203.
- [14] LIN C, ZHANG X, XIAO J, et al. Effects on longevity extension and mechanism of action of carnosic acid in *Caenorhabditis elegans*[J]. Food & Funct, 2019, 10(3): 1398-1410.
- [15] MCINTYRE G, WRIGHT J, WONG H T, et al. Effects of FUDr on gene expression in the *C. elegans* bacterial diet OP50[J]. BMC Research Notes, 2021, 14(1): 207.
- [16] WANG H, ZHAO J, YANG S N, et al. Anti-aging effects and underlying mechanism of D-chiro-inositol on glucose-induced oxidative damage in *Caenorhabditis elegans*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(2): 282-286.
- [17] SONG B B, XIA W, LI T, et al. Mitochondria are involved in the combination of blueberry and apple peel extracts synergistically ameliorating the lifespan and oxidative stress in *Caenorhabditis elegans*[J]. Food & Function, 2022, 13(15): 8204-8213.
- [18] CHANDLER-BROWN D, CHOI H, PARK S, et al. Sorbitol treatment extends lifespan and induces the osmotic stress response in *Caenorhabditis elegans*[J]. Frontiers in Genetics, 2015, 6: 316.
- [19] BRESOLÍ-OBACH R, BUSTO-MONER L, MULLER C, et al. NanoDCFH-DA: a silica-based nanostructured fluorogenic probe for the detection of reactive oxygen species[J]. Photochemistry and Photobiology, 2018, 94(6): 1143-1150.
- [20] LI Z H, CUI B, LIU X W, et al. Virucidal activity and the antiviral mechanism of acidic polysaccharides against Enterovirus 71 infection *in vitro*[J]. Microbiology and Immunology, 2020, 64(3): 189-201.
- [21] BILAN M I, KLOCHKOVA N G, SHASHKOV A S, et al. Polysaccharides of Algae 71*. Polysaccharides of the Pacific brown alga *Alaria marginata*[J]. Russian Chemical Bulletin, 2018, 67(1): 137-143.
- [22] JAYAPALA N, TORAGALL V, GNANESH KUMAR B S, et al. Preparation, characterization, radical scavenging property and antidiabetic potential of laminaria oligosaccharides

- derived from laminarin[J]. *Algal Research*, 2022, 63: 102642.
- [23] LESANPEZESHKI L, QADOTA H, DARABAD M N, et al. Investigating the correlation of muscle function tests and sarcomere organization in *C. elegans*[J]. *Skeletal Muscle*, 2021, 11(1): 20.
- [24] JIN S Y, LI D Q, LU S, et al. Ethanol extracts of Panax notoginseng increase lifespan and protect against oxidative stress in *Caenorhabditis elegans* via the insulin/IGF-1 signaling pathway[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 58: 218-226.
- [25] PAPAENVENIOU N, HOEHN A, TUR J A, et al. Sugar-derived AGEs accelerate pharyngeal pumping rate and increase the lifespan of *Caenorhabditis elegans*[J]. *Free Radical Research*, 2019, 53(sup1): 1 056-1 067.
- [26] 施滢, 王平, 代君怡, 等. 基于秀丽隐杆线虫模型探讨白芥子水提物抗氧化作用及机制[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(23): 7 773-7 778.
- SHI Y, WANG P, DAI J Y, et al. Study on antioxidative effect and mechanism of water extracts of white mustard seed based on *Caenorhabditis elegans* model[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(23): 7 773-7 778.
- [27] LI R, TAO M F, XU T T, et al. Small berries as health-promoting ingredients: a review on anti-aging effects and mechanisms in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Food & Function*, 2022, 13(2): 478-500.
- [28] KUČEROVÁ L, KUBRAK O I, BENGTSSON J M, et al. Slowed aging during reproductive dormancy is reflected in genome-wide transcriptome changes in *Drosophila melanogaster*[J]. *BMC Genomics*, 2016, 17: 50.
- [29] LIU H M, LIU B J, ZHANG S Q, et al. Lentinan protects *Caenorhabditis elegans* against fluopyram-induced toxicity through *DAF-16* and *SKN-1* pathways[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 265: 115510.
- [30] MA J, WANG R R, CHEN T, et al. Protective effects of baicalin in a *Caenorhabditis elegans* model of Parkinson's disease[J]. *Toxicology Research*, 2021, 10(3): 409-417.
- [31] SCHIEBER M, CHANDEL N S. ROS function in redox signaling and oxidative stress[J]. *Curr Biol*, 2014, 24(10): R453-R462.
- [32] DEHGHAN E, ZHANG Y Q, SAREMI B, et al. Hydralazine induces stress resistance and extends *C. elegans* lifespan by activating the *NRF2/SKN-1* signalling pathway[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 2 223.
- [33] HAVERMANN S, HUMPF H U, WÄTJEN W. Baicalein modulates stress-resistance and life span in *C. elegans* via SKN-1 but not *DAF-16*[J]. *Fitoterapia*, 2016, 113: 123-127.
- [34] SRIVASTAVA S, SAMMI S R, LAXMAN T S, et al. Silymarin promotes longevity and alleviates Parkinson's associated pathologies in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 31: 32-43.
- [35] HOSHIKAWA H, UNO M, HONJOH S, et al. Octopamine enhances oxidative stress resistance through the fasting-responsive transcription factor *DAF-16/FOXO* in *C. elegans* [J]. *Genes to Cells*, 2017, 22(2): 210-219.
- [36] KIMURA K D, TISSENBAUM H A, LIU Y, et al. Daf-2, an insulin receptor-like gene that regulates longevity and diapause in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Science*, 1997, 277(5 328): 942-946.
- [37] MARTINS R, LITHGOW G J, LINK W. Long live FOXO: unraveling the role of FOXO proteins in aging and longevity [J]. *Aging Cell*, 2016, 15(2): 196-207.
- [38] LUO J R, ZHANG X Y, LI W, et al. Pentagalloyl glucose enhanced the stress resistance to delay aging process in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Process Biochemistry*, 2024, 146: 462-472.
- [39] LITHGOW G J, WHITE T M, MELOV S, et al. Thermotolerance and extended life-span conferred by single-gene mutations and induced by thermal stress[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 1995, 92(16): 7 540-7 544.
- [40] LEWIS K N, WASON E, EDREY Y H, et al. Regulation of Nrf-2 signaling and longevity in naturally long-lived rodents [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(12): 3 722- 3 727.
- [41] LEES H, WALTERS H, COX L S. Animal and human models to understand ageing[J]. *Maturitas*, 2016, 93: 18-27.