

郑逸帆, 杨丰绮, 付晓婷, 等. 喇叭藻岩藻多糖的抗黑色素生成和抗皱功效 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 441-447. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080230

ZHENG Yifan, YANG Fengqi, FU Xiaoting, et al. Anti-melanogenesis and Anti-wrinkle Effects of the Fucoidan Isolated from *Turbinaria ornata*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 441-447. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080230

· 营养与保健 ·

喇叭藻岩藻多糖的抗黑色素生成和抗皱功效

郑逸帆¹, 杨丰绮², 付晓婷¹, 高 昕^{1,3}, 王 雷^{1,3,*}

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266404;
2. 济州国立大学, 韩国济州特别自治道 63243;
3. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南三亚 572024)

摘要:目的: 探究从喇叭藻分离出的岩藻多糖 TO-F10 的体外抗黑色素生成和抗皱作用。方法: 本研究采用化学比色法评价不同浓度下的 TO-F10 对酪氨酸酶和胶原蛋白酶的抑制效果, 并通过甲基噻唑基四唑法、多巴氧化法、2',7'-二氯荧光素二乙酸酯法和酶联免疫吸附试验研究 TO-F10 对 α -黑色素细胞刺激素诱导的小鼠黑色素瘤细胞 (mouse melanoma cells, B16F10) 的细胞活力、黑色素含量和酪氨酸酶活性, 以及对中波紫外线 (ultraviolet B, UVB) 诱导的人皮肤成纤维细胞 (human dermal fibroblasts, HDF) 的活性氧水平、胶原蛋白含量、基质金属蛋白酶表达量和促炎细胞因子产生量的影响。结果: 100 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下, TO-F10 对酪氨酸酶和胶原蛋白酶抑制率分别高达 $26.98\% \pm 1.76\%$ 和 $37.60\% \pm 0.60\%$ 。 α -黑色素细胞刺激素诱导的 B16F10 细胞黑色素含量上升和酪氨酸酶活性下降受 TO-F10 处理得到显著回调 ($P < 0.01$)。TO-F10 能够通过抑制氧化应激、胶原蛋白降解和炎症来保护暴露于 UVB 的 HDF 细胞, 但仅在 50 和 100 $\mu\text{g/mL}$ 时细胞活力提升较显著 ($P < 0.05$)。结论: 喇叭藻岩藻多糖 TO-F10 具有抗黑色素生成和抗皱功效, 有望应用于功能性食品行业。

关键词:喇叭藻, 岩藻多糖, 紫外线 B, 抗黑色素生成, 抗皱, 光损伤

中图分类号: TQ652

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)14-0441-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080230



本文网刊:

Anti-melanogenesis and Anti-wrinkle Effects of the Fucoidan Isolated from *Turbinaria ornata*

ZHENG Yifan¹, YANG Fengqi², FU Xiaoting¹, GAO Xin^{1,3}, WANG Lei^{1,3,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China;
2. Department of Marine Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea;
3. Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572024, China)

Abstract: Objective: Investigating the *in vitro* anti-melanogenesis and anti-wrinkle effects of the fucoidan TO-F10 isolated from *Turbinaria ornata*. Methods: The colorimetric method was utilized to evaluate the inhibitory effects of TO-F10 at different concentrations on tyrosinase and collagenase in this study. The methyl thiazolyl tetrazolium (MTT) assay, DOPA oxidation assay, 2',7'-dichlorofluorescein diacetate (DCFH2-DA) assay, and enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) were used to examine the effects of TO-F10 on the cell viability, melanin content and tyrosinase activity in α -melanocyte-stimulating hormone (α -MSH)-induced mouse melanoma cells (B16F10), as well as its impact on the reactive oxygen species (ROS) level, the collagen content, matrix metalloproteinase (MMP) expression, and pro-inflammatory cytokine production in ultraviolet B (UVB)-induced human dermal fibroblasts (HDF). Results: At a concentration of 100 $\mu\text{g/mL}$, TO-F10 inhibited tyrosinase and collagenase by $26.98\% \pm 1.76\%$ and $37.60\% \pm 0.60\%$, respectively. The increase in melanin content and decrease in tyrosinase activity in α -MSH-induced B16F10 cells were significantly reversed by TO-F10

收稿日期: 2024-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2100605); 青岛市自然科学基金项目 (23-2-1-63-zyyd-jch); 青岛市海洋创新项目 (23-1-3-hygg-23-hy)。

作者简介: 郑逸帆 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: yfzheng2022@163.com。

* 通信作者: 王雷 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 海藻精深加工与高值化利用, E-mail: leiwang2021@ouc.edu.cn。

treatment ($P<0.01$). UVB-exposed HDF cells were protected by TO-F10 through the inhibition of oxidative stress, collagen degradation, and inflammation. However, it significantly increased in cell viability were observed only at 50 and 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ($P<0.05$). Conclusion: TO-F10 was shown to possess anti-melanogenesis and anti-wrinkle properties, with its applicability in the functional food industry being indicated.

Key words: *Turbinaria ornata*; fucoidan; ultraviolet B (UVB); anti-melanogenesis; anti-wrinkle; photodamage

皮肤是人体最大的器官,作为第一道屏障对人体健康具有至关重要的作用^[1]。然而正因为暴露于外部环境中,皮肤不可避免地受到化学品、空气污染、紫外线等环境因素的损害^[2]。这些环境因素会引起氧化损伤、炎症反应、色素合成失调和胶原蛋白降解等皮肤损伤,进而导致皮肤衰老甚至诱发其它疾病^[3]。

紫外线(ultraviolet, UV)辐射是导致人类皮肤损伤的主要环境因素。紫外线根据波长可以分为 UVA(315~400 nm)、UVB(280~315 nm)和 UVC(100~280 nm)三种亚型,而中波紫外线(ultraviolet B, UVB)对皮肤刺激更大^[4]。黑色素能够保护皮肤免受由紫外线引起的光老化,但黑色素的过量生成和累积会导致老年斑、黄褐斑等皮肤问题^[5]。酪氨酸酶能够催化酪氨酸生成 L-二羟基苯丙氨酸多巴,进一步催化生成黑色素前体物多巴醌,是黑色素合成反应的关键限速酶^[6]。胶原蛋白是皮肤中的关键结构和功能蛋白质之一,也是细胞外基质的主要成分,会被不同种类的胶原酶降解^[7]。胶原蛋白的降解会导致皮肤结构破坏和真皮层塌陷,这是皮肤皱纹的主要特征之一^[8]。基质金属蛋白酶(matrix metalloproteinases, MMPs)是一类结构类似的胶原酶,可以降解结缔组织中的胶原细胞外基质,加速皱纹的形成^[9]。而紫外线辐射可以破坏真皮细胞功能,降解胶原蛋白,诱发活性氧(reactive oxygen species, ROS)和细胞促炎因子水平上升^[10]。因此,挖掘具有抑制黑色素生成和胶原蛋白降解功效的活性成分并将其应用于化妆品行业,引起了广泛关注。

海藻含有多种生物活性化合物,如蛋白质、脂肪酸、多酚、多糖等,其中多糖占干重的 30%~40%^[11-12]。岩藻多糖是从褐藻和海参中分离出来的硫酸多糖,具有多种健康益处,如抗炎^[13]、抗氧化^[14]、抗肿瘤^[15]和抗紫外^[16]等作用。有报道称,从羊栖菜中分离的岩藻多糖能够通过调节细胞外信号调节激酶/丝裂原活化蛋白激酶(extracellular signal-regulated kinase/mitogen-activated protein kinase, ERK/MAPK)通路抑制小鼠黑色素瘤细胞(mouse melanoma cells, B16F10)内的酪氨酸酶活性,有望应用于化妆品行业^[17]。喇叭藻(*Turbinaria ornata*)是一种马尾藻属的热带褐藻,其产地遍布全球热带海岸,广泛分布于印度-太平洋至加勒比地区^[18-19]。已有研究表明喇叭藻具有抗氧化^[20]、抗病毒^[21]和 α -葡萄糖苷酶抑制活性^[22]。在课题组前期研究中,从喇叭藻中分离出一种岩藻多糖(TO-F10),发现 TO-F10 能够

抑制脂多糖引起的炎症反应,缓解 2,2'-偶氮二(2-甲基丙基咪)二盐酸盐(2,2'-azobis 2-methylpropionamide dihydrochloride, AAPH)造成的氧化损伤,改善 UVB 诱导的皮肤角质形成细胞的氧化损伤^[23-24]。本研究旨在通过比色法和细胞实验评价 TO-F10 的抗黑色素生成和抗皱功效,为喇叭藻岩藻多糖在功能性食品和化妆品领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

喇叭藻 采集于马尔代夫海岸线;小鼠黑色素瘤细胞 美国菌种保藏中心(american type culture collection, ATCC);人皮肤成纤维细胞(human dermal fibroblasts, HDF) 韩国细胞库;I 型前胶原羧基末端肽(procollagen type I carboxy-terminal peptide, PIP)试剂盒 日本 TaKaRa Bio Inc.公司;人类基质金属蛋白酶(matrix metalloproteinases, MMP)-1、-2、-8、-9 和 -13 酶联免疫吸附试验(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒 英国 GE 集团;甲基噻唑基四唑(methyl thiazolyl tetrazolium, MTT)、 α -黑色素细胞刺激素(α -melanocyte stimulating hormone, α -MSH)、蘑菇酪氨酸酶(1000 units/mL)、胶原蛋白酶(200 units/mL)、二甲基亚砜、2',7'-二氯荧光素二乙酸酯(2',7'-dichlorofluorescein diacetate, DCFH2-DA)、磷酸盐缓冲液(PBS, pH6.5) 美国 Sigma 公司;Ham's F-12 营养混合物培养基、DMEM 培养基、胎牛血清(fetal bovine serum, FBS)和抗生素(青霉素和链霉素(P/S)) 美国 Gibco-BRL 公司;实验所用其它试剂 均为分析纯级别。

Synergy HT 酶标仪 美国 BioTek 公司;VL-6LM UVB 灯 法国 Vilber Lourmat 公司;MCO-18AIC 二氧化碳培养箱 日本 Sanyo 公司;Cool SNAP Pro 荧光成像相机 日本 Olympus 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 喇叭藻岩藻多糖 TO-F10 的制备 喇叭藻岩藻多糖 TO-F10 的制备与表征参照先前的研究^[23]。采集的喇叭藻经过水洗除盐、冷冻干燥、研磨以及乙醇脱色后,滤出并用 95% 乙醇浸提三次并干燥,以排除样品中脂质、色素、酚类等物质的干扰。取 100 g 处理后的喇叭藻样品于 1 L 去离子水中,调节 pH 至 4.5 并加入 0.5% 的纤维素酶(≥ 700 U/g),于 50 $^{\circ}\text{C}$ 下振荡提取 24 h。结束后将样品置于 95 $^{\circ}\text{C}$ 热水中煮沸 10 min,使纤维素酶灭活。加入适量的

氯化钙以使提取液中的藻酸盐转化成藻酸钙沉淀。离心收集上清液并调节 pH 至中性,浓缩至原体积的 1/3 后加入 4 倍体积的乙醇于 4 ℃ 静置 8 h。最后离心、冻干得到喇叭藻粗岩藻多糖。接着复溶于水在 DEAE-纤维素柱中以不同浓度 NaCl 洗脱后得到十组峰,筛选得到活性最佳的组分 TO-F10。

1.2.2 TO-F10 的酶抑制作用 参照 Wang 等^[17] 的方法,评价 TO-F10 对酪氨酸酶的抑制作用。将含有 10 μ L 蘑菇来源的酪氨酸酶溶液、10 μ L TO-F10 溶液、40 μ L L-酪氨酸(1.5 mmol/L)和 140 μ L 磷酸盐缓冲液(50 mmol/L, pH6.5)的反应混合物置于 96 孔板中,在 37 ℃ 下孵育 12 min。然后将 96 孔板置于冰上停止反应,冷却后通过比色法分析反应产生的多巴醌总量。

参照 Heo 等^[25] 的方法,评估 TO-F10 的胶原蛋白酶抑制活性,将 100 μ L TO-F10 溶液与 800 μ L Tris-HCl(0.1 mol/L, pH7.0)、1 mg 的偶氮骨胶原和 100 μ L 胶原蛋白酶混合。混合物在 43 ℃ 反应 1 h 后,将反应混合物离心(3000 r/min, 10 min),冷却后在 550 nm 处检测上清液的吸光度。

1.2.3 细胞培养 将 B16F10 细胞培养在 DMEM (10% FBS 和 1% P/S)中,并以 1×10^5 或 3×10^4 个细胞/mL 的密度接种到 24 孔板或 6 孔板用于实验。将 HDF 细胞培养在 F-12 和 DMEM(10% FBS 和 1% P/S)1:3 混合的培养基中,并以 5×10^4 个细胞/mL 的浓度接种于孔板中用于实验。

1.2.4 TO-F10 细胞毒性的测定 为测定不同浓度 TO-F10 对 B16F10 细胞活力的影响,需将细胞接种在 24 孔板中,分别用 25、50 和 100 μ g/mL TO-F10 处理 B16F10 细胞 24 h,MTT 法测定^[26]。为了测量 UVB 照射的 HDF 细胞的活力,需分别用 25、50 和 100 μ g/mL TO-F10 处理并在 37 ℃ 下孵育 2 h。然后将细胞暴露于 50 mJ/cm² 的 UVB 并孵育 48 h,并测定 540 nm 处的吸光度。将 1×PBS 缓冲液代替样品溶液处理的对照组细胞的活力视为 100%。

1.2.5 TO-F10 对 α -MSH 诱导的 B16F10 细胞黑色素生成的影响 参照 Tsuboi 等^[27] 的方法并稍作修改,测定 TO-F10 对 B16F10 细胞内黑色素含量的影响。将 B16F10 细胞接种在 6 孔板中并分别用 25、50 和 100 μ g/mL 浓度 TO-F10 处理,孵育 1 h 后,用 50 nmol/L 的 α -MSH 处理细胞,随后继续孵育 72 h。收集细胞,并将其溶解在含 10% 二甲基亚砜的 1 mol/L 氢氧化钠中,80 ℃ 孵育 1 h。高速离心 10 min 后,测定上清液在 490 nm 波长下的吸光度。酪氨酸酶活性在收集细胞后参照 1.2.2 进行测定。

1.2.6 TO-F10 对 UVB 诱导 HDF 细胞损伤的影响 采用 DCF-DA 法测定暴露于 UVB 的 HDF 细胞内 ROS 水平^[28]。分别用 25、50 和 100 μ g/mL TO-F10 处理 HDF 细胞 30 min。随后,用 500 μ g/mL

DCFH2-DA 处理细胞并继续孵育 30 min。孵育后,将细胞暴露于 UVB(50 mJ/cm²)并在 37 ℃ 下孵育 1 h。在 485 nm 的激发波长和 535 nm 的发射波长下检测 2'-7'-二氯荧光素的荧光强度。

使用 ELISA 试剂盒检测促炎细胞因子、胶原蛋白和基质金属蛋白酶水平^[29-30]。将 HDF 细胞与 TO-F10 孵育 2 h,并暴露于 UVB(50 mJ/cm²)。孵育 48 h 后,收集培养液并用于评价反映胶原合成水平的 MMPs 表达水平和 PIP 水平。PIP 和 MMPs 的表达量通过 ELISA 试剂盒测量,具体方法参照制造商的说明书。

1.3 数据处理

在本研究中,所有实验均重复三次进行。数据表示为平均值 $\pm$ 标准差,使用 SPSS 20.0. 进行单因素方差分析比较平均值。通过 Tukey 检验确定平均值之间的显著差异; $P < 0.05$ 表示差异显著,以不同字母代表组间差异。

2 结果与分析

2.1 TO-F10 对酪氨酸酶和胶原蛋白酶的抑制作用

本实验在化学层面分别测定了 25、50 和 100 μ g/mL 的 TO-F10 反应后的多巴醌总量,计算出酪氨酸酶和胶原酶活性的抑制率如图 1 所示。图 1A 显示,TO-F10 在低、中、高剂量下对酪氨酸酶的抑制率随浓度上升显著提升($P < 0.05$)。王生琳等^[31] 分析了五种枸杞多糖的体外酪氨酸酶活性,0.1 mg/mL 浓度下抑制率仅为 TO-F10 的 60%~70%。Heo 等^[25] 研究

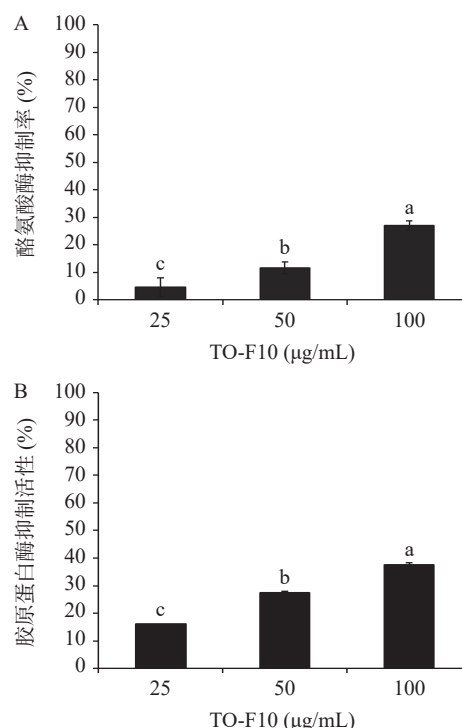


图 1 TO-F10 对酪氨酸酶(A)和胶原蛋白酶(B)的抑制作用
Fig.1 Inhibitory effects of TO-F10 on tyrosinase (A) and collagenase (B)

注:不同小写字母表示组间差异显著, $P < 0.05$,图 2~图 5 同。

了 21 种大型海藻提取物在 100 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下的酪氨酸酶抑制率,其中仅两种提取物的抑制率高于 TO-F10。图 1B 表明,100 $\mu\text{g/mL}$ 的 TO-F10 对胶原蛋白酶的抑制率达到了 $37.60\%\pm 0.60\%$ 。而市售褐藻糖胶在 1000 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下的胶原蛋白酶抑制率也仅为 39.80% ^[32]。由此可见,从喇叭藻中分离的岩藻多糖 TO-F10 可能通过抑制酪氨酸酶和胶原酶而具有减少黑色素生成和胶原蛋白降解的功效。

2.2 TO-F10 的抗黑色素生成作用

TO-F10 的美白功效见图 2。图 2A 中,25、50、100 $\mu\text{g/mL}$ 的 TO-F10 对 B16F10 细胞均无毒性。而图 2B 表明 TO-F10 显著($P<0.05$)降低了 α -MSH 刺激的 B16F10 细胞中的黑色素含量。50 nmol/L α -MSH 刺激的模型组黑色素含量显著提高($P<0.01$),而这一数值在低、中、高剂量的 TO-F10 处理后分别下降了 16.47%、27.17% 和 30.12%。然而,从团扇

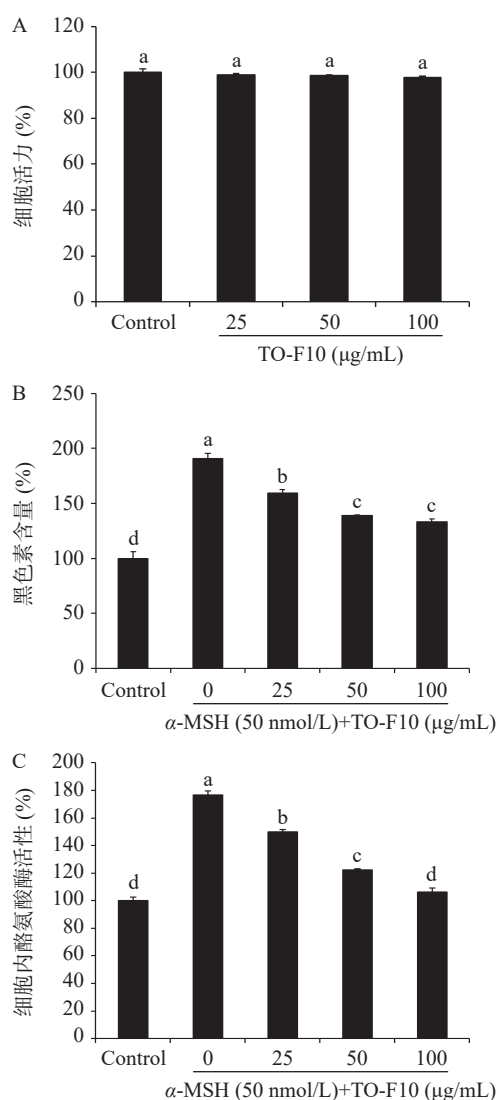


图 2 TO-F10 的皮肤美白功效

Fig.2 Skin whitening effects of TO-F10

注: A 为 TO-F10 对 B16F10 细胞的细胞毒性; B 为 TO-F10 对 α -MSH 刺激的 B16F10 细胞黑色素合成的影响; C 为 TO-F10 对 α -MSH 刺激 B16F10 细胞的相对胞内酪氨酸酶活性的影响。

藻中分离出的硫酸多糖在该浓度梯度下能够使黑色素含量分别降低 9.85%、29.00% 和 37.37%^[33]。可以看出在 25 $\mu\text{g/mL}$ 时 TO-F10 的抑制效果更好,而 100 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下,团扇藻硫酸多糖处理组的黑色素含量降低更明显。B16F10 细胞内的酪氨酸酶活性也从模型组的 176.55% 分别下降了 15.10%、30.60% 和 39.84%,而 200 $\mu\text{mol/L}$ 的 10-羟基喜树碱和白藜芦醇也仅降低了 20%~30% 的 B16F10 细胞内酪氨酸酶活性^[34]。这也揭示了 TO-F10 可能通过抑制 α -MSH 刺激的 B16F10 细胞内酪氨酸酶活性而减少黑色素生成。这些结果表明,TO-F10 具有潜在的美白功效,揭示其在医药化妆品工业中的潜力。

2.3 TO-F10 对 UVB 照射的细胞光损伤的保护作用

2.3.1 TO-F10 对细胞活力与细胞内 ROS 水平的影响 不同浓度 TO-F10 处理对 UVB 照射的 HDF 细胞活力和细胞内 ROS 水平的影响见图 3。在图 3A 中,与未照射的细胞相比,UVB 照射的 HDF 细胞的活力显著降低($P<0.01$)。这可能是 UVB 照射引起了 ROS 的产生,进而损伤了细胞,而 TO-F10 预处理缓解了这种趋势。图 3B 的结果显示,UVB 照射促使 HDF 细胞内 ROS 水平上升至 $186.87\%\pm 2.48\%$,而低、中、高浓度 TO-F10 组中 ROS 水平显著降低至 $160.36\%\pm 1.02\%$ 、 $146.34\%\pm 0.02\%$ 和 $133.44\%\pm 0.02\%$ 。Liu 等^[35]的研究表明海藻多糖通过上调抗氧化酶水平以降低 ROS 产生量,发挥对细胞的保护作用。总之,TO-F10 剂量依赖性的显著抑制了

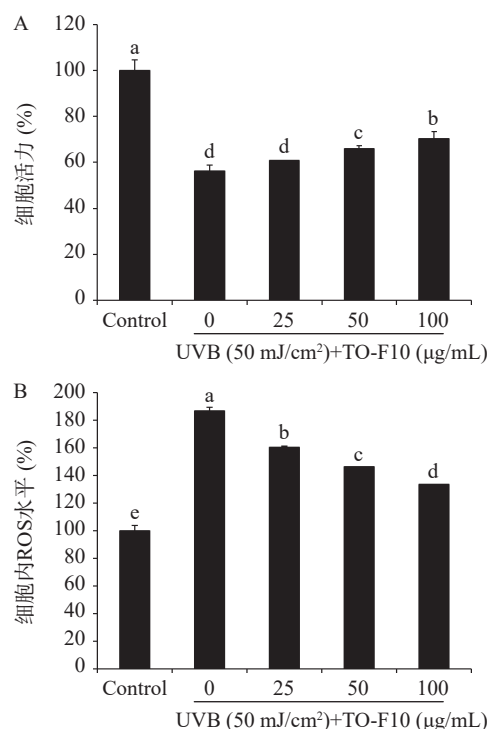


图 3 TO-F10 对 UVB 诱导 HDF 细胞保护作用

Fig.3 Protective effects of TO-F10 against UVB-induced HDF cell damage

注: A 为 UVB 照射的 HDF 细胞的活力; B 为 UVB 照射的 HDF 细胞的细胞内 ROS 水平。

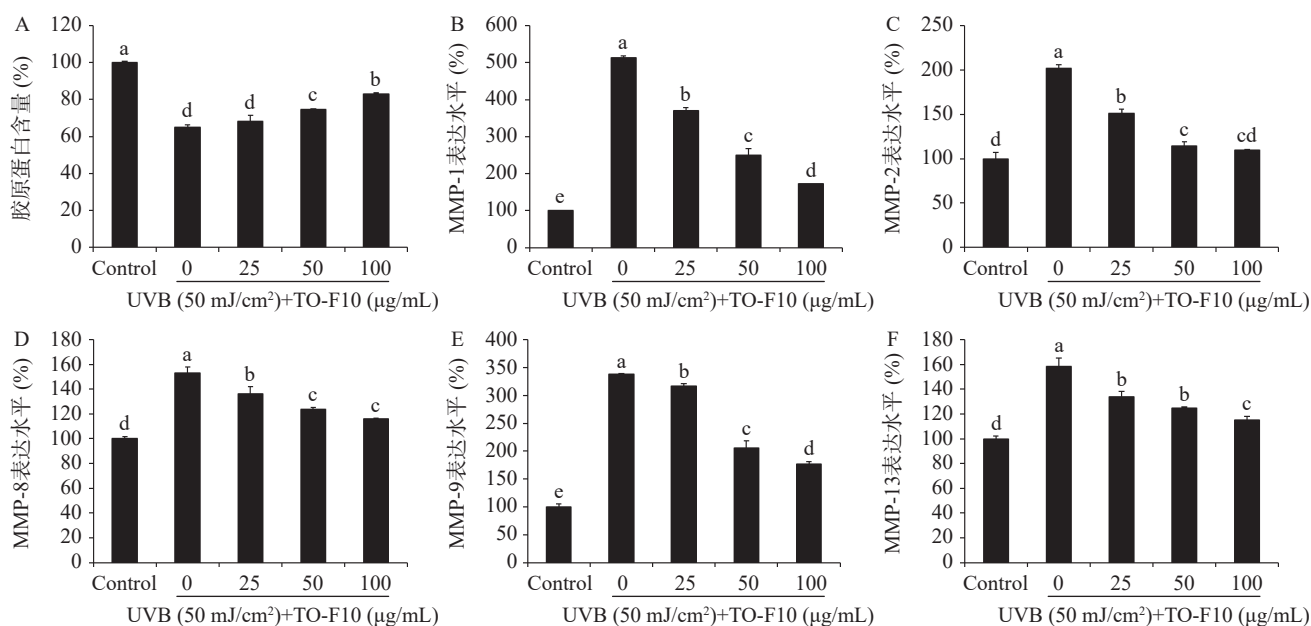


图 4 TO-F10 对 UVB 照射的 HDF 细胞胶原蛋白合成及 MMPs 表达的影响

Fig.4 Effects of TO-F10 treatment on collagen synthesis and matrix metalloproteinases (MMPs) expression in UVB-irradiated HDF cells

注: A 为 UVB 照射的 HDF 细胞中胶原蛋白合成水平; B~F 分别为 UVB 照射的 HDF 细胞中的 MMP-1、MMP-2、MMP-8、MMP-9 和 MMP-13 表达水平。

UVB 诱导的 HDF 细胞死亡 ($P < 0.05$), TO-F10 处理使 ROS 水平降低在这一过程中发挥重要作用。

2.3.2 TO-F10 的抗皱作用 TO-F10 改善 UVB 照射的 HDF 细胞中的胶原蛋白合成并降低 MMPs 表达见图 4。通过测定 I 型前胶原羧基末端多肽, 间接观察胶原合成水平。如图 4A 所示, UVB 照射显著减少 HDF 细胞的胶原蛋白合成, 而 TO-F10 呈剂量依赖性地保护胶原蛋白合成。与正常细胞相比, 经 UVB 照射后的 HDF 细胞胶原蛋白含量降低至 $64.99\% \pm 1.16\%$, 而 TO-F10 处理后胶原蛋白含量在此基础上分别提升了 $3.20\% \pm 0.47\%$ 、 $9.78\% \pm 0.40\%$ 和 $17.92\% \pm 1.00\%$ 。此外, MMP-1、MMP-2、MMP-8、MMP-9 和 MMP-13 五种基质金属蛋白酶的表达水平结果如图 4B~图 4F 所示。在 UVB 照射的 HDF 细胞中, MMPs 的表达水平显著增加 ($P < 0.01$), 而在 TO-F10 预处理的细胞中, 这一趋势被显著缓解 ($P < 0.05$)。表明 TO-F10 能有效减少 MMPs 的表达

以保护胶原蛋白合成。然而低剂量组抑制 MMPs 表达的效果稍差, 这也是导致该组胶原蛋白含量提升效果不显著的原因之一。这些结果表明, TO-F10 通过抑制 MMPs 的表达来保护 HDF 细胞免受 UVB 辐射刺激的胶原蛋白降解。然而, TO-F10 抑制 MMPs 和提升胶原蛋白含量的作用稍差于此前从羊栖菜中提取的岩藻多糖。具体表现为 $100 \mu\text{g/mL}$ 浓度下羊栖菜岩藻多糖能够完全抵消 UVB 引起的胶原蛋白降解, 而 TO-F10 仅能够缓解部分下降趋势^[29]。

2.3.3 TO-F10 的抗炎作用 TO-F10 对 HDF 细胞促炎因子的抑制作用如图 5 所示。紫外线照射可刺激促炎细胞因子, 包括肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白介素 6 (interleukin-6, IL-6) 和白介素 1β (interleukin- 1β , IL- 1β)。然而, 在 UVB 照射的 HDF 细胞中, 这些细胞促炎因子的水平以浓度依赖的方式显著降低 ($P < 0.01$)。这些结果

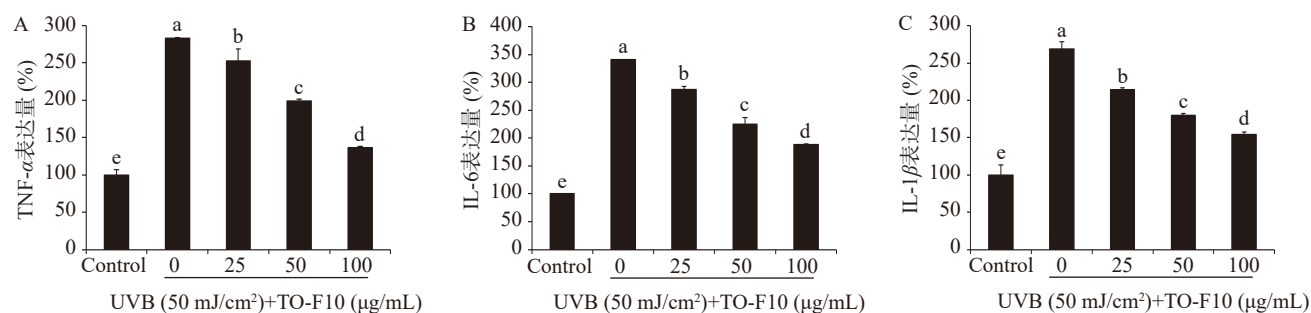


图 5 TO-F10 抑制 UVB 照射的 HDF 细胞中促炎细胞因子的表达

Fig.5 TO-F10 inhibits pro-inflammatory cytokines expression in UVB-irradiated HDF cells

注: A~C 分别为 UVB 照射 HDF 细胞 TNF- α 、IL-6 和 IL- 1β 的表达量。

表明, TO-F10 可降低 UVB 辐射刺激的 HDF 细胞的炎症反应。综上所述, TO-F10 通过抑制氧化应激、胶原降解和减少细胞促炎因子的表达来预防 UVB 辐射所致的皮肤损伤。

3 结论

本研究通过化学法发现喇叭藻岩藻多糖 TO-F10 的可能存在抗黑色素生成和抗皱作用, 并以 B16F10 细胞和 HDF 细胞为模型进行深入分析。结果表明: TO-F10 通过抑制酪氨酸酶活性和减少 α -MSH 刺激的 B16F10 细胞中的黑色素含量, 从而抑制黑色素生成作用。TO-F10 的抗皱作用体现在多个方面: 保护 HDF 细胞免受 UVB 照射引起的细胞损伤, 提升细胞活力; 清除细胞内 ROS 从而保护细胞免受氧化应激损伤; 抑制 MMPs 表达量, 进而减少胶原蛋白的降解, 发挥抗皱功效; 减少 HDF 细胞中促炎细胞因子的表达, 预防和缓解皮肤炎症。

总之, TO-F10 具有良好的体外减少黑色素生成和抑制皱纹产生的功效。本研究为喇叭藻岩藻多糖在化妆品行业的应用提供了理论依据, 有望作为功效成分应用于功能性食品行业, 以缓解 UVB 引起的皮肤老化。未来, 可重点关注 TO-F10 在体内的抗黑色素生成作用, 抗皱功效, 以及其它潜在生物活性。

© The Author(s) 2025. 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] 刘园园, 赵心明, 杨珍, 等. 肉苁蓉多糖对 UVB 诱导皮肤急性光损伤的保护作用[J]. 农业与技术, 2021, 41(21): 36–39. [LIU Y Y, ZHAO X M, YANG Z, et al. Protective effect of polysaccharides from *Cistanche deserticola* on UVB induced acute photodamage to the skin[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(21): 36–39.]
- [2] LIU Y N, QU L L, WAN S C, et al. Ginsenoside Rk1 prevents UVB irradiation-mediated oxidative stress, inflammatory response, and collagen degradation via the PI3K/AKT/NF- κ B pathway *in vitro* and *in vivo*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(50): 15804–15817.
- [3] WANG L, JE J G, KIM H S, et al. Anti-melanogenesis and photoprotective effects of *Ecklonia maxima* extract containing dieckol and eckmaxol[J]. *Marine Drugs*, 2022, 20(9): 557.
- [4] 李立, 白雪涛. 紫外线辐射对人类皮肤健康的影响[J]. 国外医学(卫生学分册), 2008(4): 198–202. [LI L, BAI X T. The impact of ultraviolet radiation on human skin health[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2008(4): 198–202.]
- [5] BELLEI B, PICARDO M. Premature cell senescence in human skin: Dual face in chronic acquired pigmentary disorders[J]. *Ageing Research Reviews*, 2020, 57: 100981.
- [6] 刘露露, 张思瑾, 秦少通, 等. 酸枣叶缩合单宁的分离鉴定及其对黑色素生成的抑制机制[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 78–86. [LIU L L, ZHANG S J, QIN S T, et al. Isolation and identification of condensed tannins from *Ziziphus jujuba* leaves and their inhibition mechanism for melanogenesis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 78–86.]

gy of Food Industry, 2023, 44(1): 78–86.]

- [7] 石径, 田顺风, 马淑平, 等. 胶原蛋白肽改善和延缓皮肤衰老作用功效及机制的研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(21): 316–322. [SHI J, TIAN S F, MA S P, et al. Recent progress on the efficacy and mechanism of collagen peptides in improving and delaying skin aging[J]. *Food Science*, 2024, 45(21): 316–322.]
- [8] 王诗萌, 李甜, 杨田野, 等. 紫外线照射实验动物的皮肤光老化模型研究进展[J]. 中国美容医学, 2018, 27(7): 146–150. [WANG S M, LI T, YANG T Y, et al. Progress of skin photoaging models of ultraviolet irradiated experimental animals[J]. *Chinese Journal of Cosmetic Medicine*, 2018, 27(7): 146–150.]
- [9] 林芳, 马良娟. 金属蛋白酶在皮肤光老化信号通路中的研究进展[J]. *临床与病理杂志*, 2018, 38(11): 2502–2507. [LIN F, MA L J. Research progress of metalloproteinases in signaling pathways of photoaging of skin[J]. *Journal of Clinical and Pathological Research*, 2018, 38(11): 2502–2507.]
- [10] 黎静, 谢露, 覃钰, 等. 海带多糖对光老化皮肤基质金属蛋白酶活性影响的实验研究[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(14): 2370–2373. [LI J, XIE L, QIN Y, et al. Effect of laminarin polysaccharide on activity of matrix metalloproteinase in photoaging skin[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, 38(14): 2370–2373.]
- [11] SANTINON C, OCHI D, BEPPU M M, et al. Chemical modifications in the structure of seaweed polysaccharides as a viable antimicrobial application: A current overview and future perspectives[J]. *Algal Research*, 2022, 66: 102796.
- [12] BATTACHARYYA D, BABGOHARI M Z, RATHOR P, et al. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 196: 39–48.
- [13] LEE S H, KO C I, JEE Y, et al. Anti-inflammatory effect of fucoidan extracted from *Ecklonia cava* in zebrafish model[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(1): 84–89.
- [14] KOH H S A, LU J, ZHOU W B. Structure characterization and antioxidant activity of fucoidan isolated from *Undaria pinnatifida* grown in New Zealand[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 212: 178–185.
- [15] KISELEVSKIY M V, ANISIMOVA N Y, USTYUZHANI N A N E, et al. Perspectives for the use of fucoidans in clinical oncology[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(19): 11821.
- [16] FERNANDO I P S, DIAS M K H M, MADUSANKA D M D, et al. Fucoidan refined by *Sargassum confusum* indicate protective effects suppressing photo-oxidative stress and skin barrier perturbation in UVB-induced human keratinocytes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 149–161.
- [17] WANG L, OH J Y, KIM Y S, et al. Anti-photoaging and anti-melanogenesis effects of fucoidan isolated from *Hizikia fusiforme* and its underlying mechanisms[J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(8): 427.
- [18] PRATHEP A, WICHACHUCHERD B, THONGROY P. Spatial and temporal variation in density and thallus morphology of *Turbinaria ornata* in Thailand[J]. *Aquatic Botany*, 2007, 86(2): 132–138.
- [19] REMYA R R, JULIUS A, RAMADOSS R, et al. Pharmacological activities of natural products from marine seaweed *Turbinaria ornata*: A review[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 2022(1): 4784608.
- [20] SHAIBI K M M, LEEBA B, JAMUNA S, et al. Phytochemical analysis, *in vitro* antioxidant, and wound healing activities of *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh from gulf of Mannar, India[J].

- [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2022, 194(1): 395–406.
- [21] RAJA B, THAIPARAMBIL N A, DESAI K B, et al. Antiviral activity of *Turbinaria ornata* against white spot syndrome virus in freshwater crab (*Paratelphusa hydrodromous*) [J]. *Aquaculture International*, 2023, 31(4): 2165–2177.
- [22] 丁琅, 单鑫迪, 郝杰杰, 等. 拟小叶喇叭藻和喇叭藻多糖对 α -葡萄糖苷酶活性的影响 [J]. *中国海洋药物*, 2016, 35(3): 81–86.
- [DING L, DAN X D, HAO J J, et al. The α -glucosidase inhibitory effects of polysaccharides from *Turbinaria conoides* and *Turbinaria ornata* [J]. *Chinese Journal of Marine Drugs*, 2016, 35(3): 81–86.]
- [23] JAYAWARDENA T U, FERNANDO I P S, LEE W W, et al. Isolation and purification of fucoidan fraction in *Turbinaria ornata* from the Maldives; inflammation inhibitory potential under LPS stimulated conditions in *in vitro* and *in vivo* models [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 131: 614–623.
- [24] WANG L, JAYAWARDENA T U, HYUN J, et al. Antioxidant and anti-photoaging effects of a fucoidan isolated from *Turbinaria ornata* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 225: 1021–1027.
- [25] HEO S J, KO S C, KANG S M, et al. Inhibitory effect of diphenylmethoxyphenol on melanogenesis and its protective effect against UV-B radiation-induced cell damage [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(5): 1355–1361.
- [26] JAYAWARDENA T U, WANG L, SANJEEWA K K A, et al. Antioxidant potential of sulfated polysaccharides from *Padina boryana*; protective effect against oxidative stress *in vitro* and *in vivo* zebrafish model [J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(4): 212.
- [27] TSUBOI T, KONDOH H, HIRATSUKA J, et al. Enhanced melanogenesis induced by tyrosinase gene – transfer increases boron – uptake and killing effect of boron neutron capture therapy for amelanotic melanoma [J]. *Pigment Cell Research*, 1998, 11(5): 275–282.
- [28] WANG L, JAYAWARDENA T U, YANG H W, et al. The potential of sulfated polysaccharides isolated from the brown seaweed *Ecklonia maxima* in cosmetics: antioxidant, anti-melanogenesis, and photoprotective activities [J]. *Antioxidants*, 2020, 9(8): 724.
- [29] WANG L, LEE W, OH J Y, et al. Protective effect of sulfated polysaccharides from celluclast-assisted extract of *Hizikia fusiforme* against ultraviolet B-induced skin damage by regulating NF- κ B, AP-1, and MAPKs signaling pathways *in vitro* in human dermal fibroblasts [J]. *Marine Drugs*, 2018, 16(7): 239.
- [30] WANG L, OH J Y, LEE W, et al. Fucoidan isolated from *Hizikia fusiforme* suppresses ultraviolet B-induced photodamage by down-regulating the expressions of matrix metalloproteinases and pro-inflammatory cytokines via inhibiting NF- κ B, AP-1, and MAPK signaling pathways [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 166: 751–759.
- [31] 王生琳, 宰清勇, 陈华国, 等. 5 种枸杞多糖生物活性的比较研究 [J]. *中国中药杂志*, 2024, 49(1): 110–122.
- [WANG S L, ZAI Q Y, CHEN H G, et al. Comparison on biological activities of *Lycium barbarum* polysaccharides extracted with five methods [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2024, 49(1): 110–122.]
- [32] 张洋. 3 种硫酸多糖的酶抑制作用研究 [J]. *食品安全导刊*, 2024(4): 74–78.
- [ZHANG Y. Research on enzyme inhibition of three types of sulfated polysaccharides [J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(4): 74–78.]
- [33] WANG L, JAYAWARDENA T U, KIM Y S, et al. Anti-melanogenesis and anti-photoaging effects of the sulfated polysaccharides isolated from the brown seaweed *Padina boryana* [J]. *Polymers*, 2023, 15(16): 3382.
- [34] 程杏安, 张淑明, 周晓武, 等. 两种天然产物对 B16F10 细胞增殖及黑色素合成抑制机理研究 [J]. *生物技术通报*, 2017, 33(8): 199–205.
- [CHENG X A, ZHANG S M, ZHOU X W, et al. Study on inhibition mechanism of melanogenesis and melanin synthesis of B16F10 cell induced by two natural products [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2017, 33(8): 199–205.]
- [35] LIU W C, ZHUANG D P, ZHAO Y, et al. Seaweed-derived polysaccharides attenuate heat stress-induced splenic oxidative stress and inflammatory response via regulating Nrf2 and NF- κ B signaling pathways [J]. *Marine Drugs*, 2022, 20(6): 358.