

引用格式:

王雨婷, 王学红, 陆杰, 米尔扎提·阿不力米提, 车广学, 韩乐, 姬一鸣, 杨永晶. 树莓粗多糖对UVB诱导的小鼠皮肤光损伤的防护作用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 107–112.

WANG Y T, WANG X H, LU J, MIRZAT ALIMET, CHE G X, HAN L, JI Y M, YANG Y J. Protective effects of raspberry crude polysaccharides against UVB-induced skin photodamage in BALB/c mice [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 107–112.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



树莓粗多糖对 UVB 诱导的小鼠皮肤光损伤的防护作用

王雨婷, 王学红, 陆杰, 米尔扎提·阿不力米提, 车广学, 韩乐, 姬一鸣, 杨永晶*

(青海大学生态环境工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 采用树莓粗多糖(RCP)(剂量分别为50、100、200 mg/kg)对BALB/c小鼠中波紫外线(UVB)皮肤光损伤模型进行处理, 采用酶联免疫吸附法(ELISA)和微板法测定小鼠皮肤组织中基质金属蛋白酶(MMPs)、炎症因子、氧化应激等相关生理生化指标, 研究树莓粗多糖对UVB皮肤光损伤的防护作用。结果表明, RCP可明显改善BALB/c小鼠皮肤红斑、脱屑和皱纹, 并减轻皮肤局部角化过度、表皮增厚、纤维组织增生及淋巴细胞浸润。相较于模型组, 低剂量RCP组肿瘤坏死因子- α (TNF- α)水平降低了16.1%, 同时基质金属蛋白酶-1(MMP-1)与基质金属蛋白酶-3(MMP-3)的含量分别减少了22.1%与43.3%; 中剂量RCP组丙二醛(MDA)含量下降18.9%, TNF- α 水平降低37.4%, MMP-1和MMP-3含量分别减少35%和48.2%; 而在高剂量RCP组中, 超氧化物歧化酶(SOD)与过氧化氢酶(CAT)的活性分别增强了21.3%和34.3%, MDA含量下降了24.8%, 白细胞介素-6(IL-6)与TNF- α 水平分别降低了33.3%和56.6%, 此外, MMP-1和MMP-3的含量也分别减少了35%和63.3%。以上结果说明RCP可通过降低基质金属蛋白酶含量、减轻炎症反应及缓解氧化应激来改善UVB引起的小鼠皮肤光损伤, 且RCP高剂量组的效果最佳。

关键词: 树莓粗多糖; 小鼠皮肤光损伤; 中波紫外线; 基质金属蛋白酶; 炎症因子; 氧化应激

中图分类号: R285.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)01-0107-06

Protective effects of raspberry crude polysaccharides against UVB-induced skin photodamage in BALB/c mice

WANG Yuting, WANG Xuehong, LU Jie, Mirzat Alimet, CHE Guangxue, HAN Le, JI Yiming, YANG Yongjing*

(College of Ecology and Environment Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: To investigate the protective effect of raspberry crude polysaccharides(RCP) against ultraviolet B(UVB)-induced skin photodamage in BALB/c mice, RCP was administered to UVB-induced BALB/c mice skin photodamage model at doses of 50, 100 and 200 mg/kg and the levels of matrix metalloproteinases, inflammatory factors and oxidative stress-related indices in skin tissue were measured by enzyme-linked immunosorbent assay(ELISA) or microplate assay. The results showed RCP significantly alleviated erythema, desquamation, wrinkles, local hyperkeratosis, epidermal thickening, fibrous tissue hyperplasia and lymphocytic infiltrate of the skin damaged by UVB. Compared to the model group, in the low-dose group, there was a 16.1% reduction in tumor necrosis factor- α (TNF- α) levels, accompanied by a decrease of 22.1% and 43.3% in matrix metalloproteinase-1(MMP-1) and matrix metalloproteinase-3(MMP-3) content, respectively. In the medium-dose group, malondialdehyde(MDA) content decreased by 18.9%, TNF- α levels dropped by 37.4%, and MMP-1 and MMP-3 content decreased by 35% and 48.2%, respectively. For the high-dose group, superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities were enhanced by

收稿日期: 2024-02-19

修回日期: 2024-10-20

基金项目: “西部之光”人才培养计划项目(2023—2025); 青海大学生态环境工程学院生态学世界一流学科研究生科技创新项目(2023-stxy-Y18)

作者简介: 王雨婷(2000—), 女, 吉林四平人, 硕士研究生, 主要从事资源保护与利用生态学研究, wuyingpr@163.com; *通信作者, 杨永晶, 博士, 副教授, 主要从事特色植物资源开发与利用研究, Yongjing223@163.com

21.3% and 34.3%, respectively, while MDA content decreased by 24.8%. Interleukin-6(IL-6) and TNF- α levels were reduced by 33.3% and 56.6%, respectively. Additionally, MMP-1 and MMP-3 content decreased by 35% and 63.3%, respectively. The above results indicated that RCP could ameliorate UVB-induced skin photodamage by inhibiting matrix metalloproteinases content, attenuating inflammation response and oxidative stress in BALB/c mice, and the high dose of RCP showed the best effect.

Keywords: raspberry crude polysaccharides; photodamage of skin in mice; ultraviolet B; matrix metalloproteinase; inflammatory factor; oxidative stress

天然植物多糖以其低毒性、高安全性和广泛的生物活性在护肤领域展现出强劲的发展势头。多糖因其具备促进伤口愈合、保湿、抗衰老及美白等多重功效,成为减轻紫外线诱导的皮肤光损伤治疗药物的候选对象。甘西鼠尾草多糖能够激活免疫活性并降低皮肤组织中的炎症因子水平,从而促进伤口愈合^[1];芦荟多糖是芦荟提取物中的主要活性成分,通常作为保湿原料在护肤品中广泛使用^[2];山药多糖可以延长秀丽隐杆线虫的寿命,具有抗衰老活性^[3]。铁皮石斛多糖制备的美白霜具有抗氧化、保湿、美白效果^[4]。

长波紫外线(UVA)和中波紫外线(UVB)能够穿过臭氧层引起皮肤不同层面的损伤。与直达皮肤真皮层的UVA辐射相比,UVB辐射具有更高的能量,且主要停留在表皮层和真皮层顶部,导致皮肤松弛、干燥和皱纹,是造成皮肤光损伤的主要原因^[5-6]。氧化应激是UVB引起皮肤光损伤的首要原因。UVB辐射后所产生的大量活性氧(ROS)会破坏皮肤氧化与抗氧化之间的平衡,导致氧化应激,使皮肤皱纹增多、毛细血管扩张、色素沉着加重^[7-8]。此外,持续的氧化应激状态会进一步激活炎症反应,促进各类炎症因子的释放。其中,白细胞介素(ILs)和肿瘤坏死因子(TNFs)与皮肤组织中基质金属蛋白酶(MMPs)的上调表达密切相关^[9-10]。过多的MMPs会降解维持皮肤结构和弹性的胶原蛋白、弹性蛋白等细胞外基质(ECM)成分,导致皮肤弹性降低、干燥脱屑和皱纹增多^[11],可见,缓解氧化应激、减少炎症因子产生及抑制MMPs的过度表达是缓解UVB诱导的皮肤光损伤的有效途径。

在预防UVB造成的皮肤光损伤方面,一些植物多糖具有显著的作用。如在UVB诱导的斑马鱼皮肤色素沉着模型和豚鼠皮肤光损伤模型中,灵芝多糖表现出显著的抑制皮肤色素沉着和缓解皮肤红斑的作用^[12]。在UVB诱导的人永生表皮

细胞(HaCaT)光损伤模型中,马尾藻多糖对MMPs的表达具有显著抑制作用,同时,还能够有效降低ROS及炎症因子的含量,具有显著的抗皮肤光老化作用^[13]。

树莓(*Rubus idaeus* L.)为蔷薇科悬钩子属灌木植物,其浆果中富含多种生理活性物质,包括花青素、鞣花酸、多糖、多酚等,被誉为“黄金水果”,在功能性食品、化妆品、医药等多个领域都极具开发潜力和应用前景^[14-15]。从树莓果实中提取的多糖已被证明具有抗氧化、抗肿瘤、抗疲劳、免疫调节和降血脂等多种功能^[16-19]。前期研究发现,在UVB诱导的HaCaT细胞光损伤模型中,树莓粗多糖(RCP)能通过减轻炎症反应、缓解氧化应激和减缓细胞凋亡预防UVB造成的光损伤^[20]。笔者利用BALB/c小鼠构建UVB皮肤光损伤模型,并分别施以50、100、200 mg/kg剂量的RCP进行处理,观察小鼠皮肤组织表观形态及病理变化,采用ELISA法测定小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3含量及IL-6和TNF- α 的表达量;采用微板法测定SOD和CAT活性及MDA含量,以此来评价RCP的体内抗UVB活性,为RCP在防晒护肤产品中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

从青海树莓农业产业化有限公司购得树莓冻果,利用超声波辅助提取法^[20]提取树莓粗多糖(RCP),用苯酚-硫酸法^[21]测得RCP的质量分数为(84.20 \pm 1.34)%。6~8周龄BALB/c雌性小鼠,购于北京华阜康生物科技股份有限公司(动物生产许可证为SCXK(京)2019-0008)。

1.2 方法

1.2.1 BALB/c小鼠UVB光损伤模型的建立

将40只小鼠脱毛(面积约为3 cm \times 3 cm),随机

分为空白组、模型组、RCP 低剂量组(50 mg/kg)、RCP 中剂量组(100 mg/kg)和 RCP 高剂量组(200 mg/kg), 每组 8 只。参照 LONG 等^[22]的方法, 确立最小红斑量(MED)为 60 mJ/cm²。在 UVB 照射前 30 min, 空白组小鼠背部皮肤涂抹 100 μ L 蒸馏水, 模型组小鼠背部皮肤不作任何处理, RCP 组小鼠背部涂抹 100 μ L 不同剂量的 RCP。除空白组小鼠外, 其余各组小鼠均使用 UVB 辐照装置对背部皮肤进行辐照。每隔 1 d 对小鼠背部皮肤辐照 1 次, 每周 3 次, 共持续 4 周。以 7 d 为一个周期, 第 1 周剂量为 60 mJ/cm², 第 2 周剂量为 120 mJ/cm², 第 3 周剂量为 180 mJ/cm², 第 4 周剂量为 240 mJ/cm²。每个周期结束后 24 h 对小鼠背部皮肤进行拍照。试验结束后将所有小鼠禁食不禁水 12 h, 用 2%~4%(体积分数)乙醚麻醉后迅速脱颈处死小鼠。取 1.0~2.0 g 小鼠背部皮肤组织, 剔除脂肪并用 PBS 漂洗去除血液, 吸水纸拭干后放入冻存管于-80 $^{\circ}$ C 待处理。

1.2.2 小鼠皮肤组织 HE 染色

取小鼠背部中间部位 2 cm \times 2 cm 的皮肤组织, 用 4%多聚甲醛溶液固定, 固定组织经全自动脱水机脱水, 之后包埋、切片, 切下的组织片采用苏木精和伊红染色。采用数字切片扫描仪对切片进行图像采集, 每张切片分别采集 100 倍和 400 倍图片。

1.2.3 RCP 处理 UVB 诱导的光损伤小鼠皮肤组织生理生化指标的测定

取小鼠约 0.1 g 皮肤组织, 加入 9 倍体积 PBS 溶液(900 μ L), 使用冷冻研磨仪制备 10%的皮肤组织匀浆, 收集上清液。采用 ELISA 试剂盒测定小鼠皮肤组织中 MMP-1、MMP-3、IL-6 和 TNF- α 的含量, 使用微板法测定小鼠皮肤组织中 SOD、CAT 活力及 MDA 含量。

1.3 数据分析

应用 GraphPad Prism 9.5.1 软件对试验数据进行统计学分析, 组间差异对比采用单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 RCP 对 UVB 诱导的光损伤小鼠皮肤状态和组织病理学的影响

如图 1 所示, 模型组小鼠皮肤经 UVB 辐照后

出现少量红斑和脱屑, 随着试验的进行, 红斑面积明显扩大且脱屑情况加剧, 并出现明显皱纹。低剂量 RCP 组小鼠背部皮肤在 UVB 辐照后出现极少量红斑, 随着试验的进行, 红斑面积逐渐增大并伴有少量脱屑和皱纹。中剂量 RCP 组的小鼠背部皮肤在辐照前期出现极少量红斑和脱屑, 辐照后期红斑面积和脱屑情况有一定增加, 且出现少量皱纹。经高剂量 RCP 处理的小鼠背部皮肤在辐照前期未见明显改变, 辐照第 3、4 周时皮肤微发红, 并伴有零星红斑、脱屑与皱纹。低、中和高剂量 RCP 组的小鼠皮肤的红斑、脱屑及皱纹现象较模型组均有较明显的改善, 其中 RCP 高剂量组小鼠皮肤情况最佳。这些结果表明, 涂抹 RCP 能缓解 UVB 诱导的皮肤干燥脱屑、红斑及皱纹, 且随着剂量的增加, 对皮肤的保护作用逐渐增强。

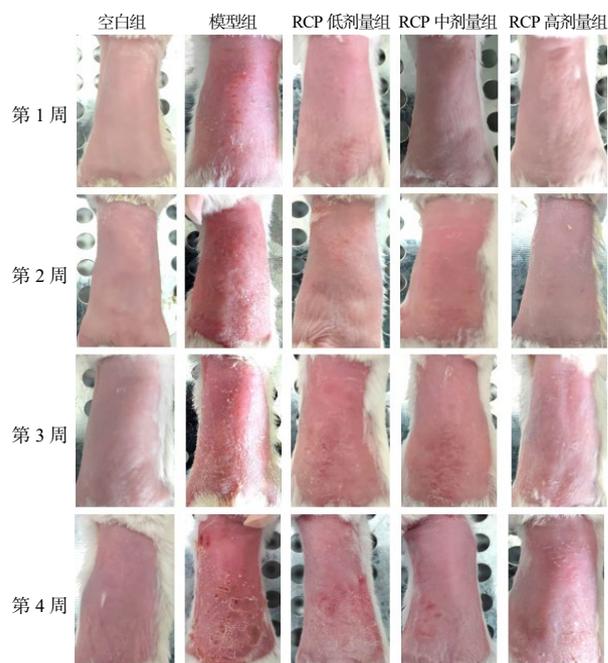
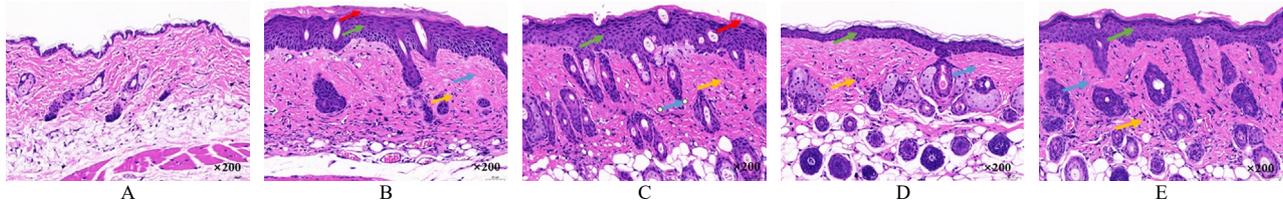


图 1 UVB 诱导的皮肤光损伤小鼠皮肤的外观

Fig.1 Skin appearance of mice with UVB-induced cutaneous photodamage

如图 2-A 所示, 经 UVB 辐射后, 模型组小鼠皮肤可见明显局部过度角化(红色箭头所示)、表皮不规则增厚(绿色箭头所示)、纤维组织增生(蓝色箭头所示)并伴有淋巴细胞浸润(黄色箭头所示)(图 2-B)。与模型组相比, 低、中和高剂量 RCP 组皮肤局部角化显著减轻, 表皮增厚情况明显改善, 淋巴细胞浸润和纤维组织增生减少。以上结果表明, 涂抹 RCP 可改善 UVB 诱导的小鼠皮肤表皮增厚、局部角化过度、淋巴细胞浸润和纤维组织增生。



A 空白组; B 模型组; C RCP 低剂量组; D RCP 中剂量组; E RCP 高剂量组。

图2 UVB 诱导的皮肤光损伤小鼠皮肤的 HE 染色结果

Fig.2 HE staining of mouse skin with UVB-induced cutaneous photodamage

2.2 RCP对UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中氧化应激的影响

表1为RCP对UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中氧化应激的影响。如图所示,相较于模型组,RCP低剂量组小鼠皮肤组织中SOD、CAT活性和MDA含量无显著性差异;RCP中剂量组小鼠皮肤组织中SOD和CAT活性无显著差异,MDA含量极显著降低;RCP高剂量组小鼠皮肤组织中SOD和CAT活性极显著升高,MDA含量极显著降低。上述结果表明高剂量RCP可提高小鼠皮肤组织中SOD和CAT活性并降低MDA含量。

表1 各组小鼠皮肤组织中抗氧化酶活性及MDA含量

Table 1 Antioxidant enzyme activities and MDA content in skin tissues of mice in each group

组别	SOD 活性/ (U·mg ⁻¹)	CAT 活性/ (U·mg ⁻¹)	MDA 含量/ (nmol·mg ⁻¹)
空白组	166.5±4.524	27.55±0.619	54.70±8.20
模型组	120.5±5.472	18.82±0.934	110.70±11.81
RCP 低剂量组	137.6±14.130	21.68±3.233	108.60±5.72
RCP 中剂量组	137.8±13.660	20.87±1.516	(89.77±3.15)##
RCP 高剂量组	(153.2±10.71)##	(28.67±1.332)##	(83.26±5.38)##

“##”表示RCP组与模型组的差异有统计学意义($P<0.01$)。

2.3 RCP对UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中IL-6和TNF-α含量的影响

RCP对小鼠皮肤组织中IL-6和TNF-α水平的的影响如表2所示。与模型组相比,RCP高剂量组小鼠皮肤组织中IL-6水平显著下降;RCP低、中剂量组小鼠皮肤组织中IL-6水平无显著性差异;RCP低、中和高剂量组小鼠皮肤组织中TNF-α水平均极显著降低,且呈现出明显的剂量依赖关系。上述结果表明RCP能减少小鼠皮肤组织中IL-6和TNF-α的表达,具有良好的抗炎作用。

表2 各组小鼠皮肤组织中IL-6和TNF-α含量

Table 2 The levels of IL-6 and TNF-α in skin tissues of mice in

组别	IL-6 含量	TNF-α 含量
空白组	901.6±228.6	28.76±3.891
模型组	1 610.0±211.3	95.84±6.721
RCP 低剂量组	1 533.0±37.8	(80.45±3.389)##
RCP 中剂量组	1 377.0±203.0	(59.98±5.846)##
RCP 高剂量组	(1 074.0±471.7)##	(41.61±5.097)##

“#”“##”表示RCP组与模型组的差异有统计学意义($P<0.05$, $P<0.01$)。

2.4 RCP对UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3含量的影响

RCP对UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3含量的影响如表3所示。相对于模型组,RCP低剂量组小鼠皮肤组织中MMP-1含量显著下降,MMP-3含量极显著下降;RCP中剂量组小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3含量均极显著降低;RCP高剂量组小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3的含量均极显著降低。以上结果表明,应用RCP可降低UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3的含量,从而保护ECM成分,减少皮肤皱纹。

表3 各组小鼠皮肤组织中MMP-1和MMP-3含量

Table 3 The contents of MMP-1 and MMP-3 in skin tissues of

组别	MMP-1 含量	MMP-3 含量
空白组	433.9±240.6	7.585±0.464
模型组	2 065.0±504.9	13.280±1.299
RCP 低剂量组	(1 609.0±195.1)#	(7.536±0.671)##
RCP 中剂量组	(1 342.0±30.7)##	(6.880±2.116)##
RCP 高剂量组	(1 346.0±38.9)##	(4.878±0.939)##

“#”“##”表示RCP组与模型组的差异有统计学意义($P<0.05$, $P<0.01$)。

3 结论与讨论

UVB 辐射诱导的皮肤光损伤的主要特征是皮肤出现皱纹、红斑及表皮增厚等^[8]。GUO 等^[23]的研究结果表明,经 UVB 辐照处理后,模型组小鼠皮肤出现明显的发红、下垂、干燥、粗糙和皱纹,而水母雪莲多糖可以使光损伤小鼠皮肤颜色更加均匀和光滑,且无脱屑、干燥等情况;HE 染色结果表明,模型组小鼠的表皮显著增厚,真皮中的胶原纤维和弹性纤维出现断裂、卷曲现象,整体结构松散且排列无序;应用水母雪莲多糖后光损伤小鼠表皮无异常增厚,纤维断裂现象有明显缓解,结构排列变得有序,角质也恢复了一定的完整性。本研究中,RCP 可有效缓解 UVB 诱导的表皮和真皮的光损伤,与上述结果一致。

当皮肤受到 UVB 的辐射后,皮肤的氧化还原系统平衡会受到干扰,产生氧化应激^[24]。SOD 和 CAT 是人体抗氧化防御系统中 2 种重要的抗氧化酶,能够清除自由基。MDA 会改变细胞内的物质交换从而导致体内自由基增多,当 SOD 和 CAT 活性降低、MDA 含量增多时,自由基清除不足或过量产生,会造成机体损伤^[25]。研究结果显示,桃胶多糖能有效提升 UVB 诱导的 HaCaT 细胞和无毛小鼠皮肤中的 SOD 和 CAT 活性,通过提高抗氧化酶活性减轻 UVB 对皮肤造成的氧化损伤^[26]。此外,在 UVB 诱导的昆明小鼠光损伤模型中,石斛多糖能通过增加 SOD 和 CAT 活性,显著降低 MDA 含量来缓解皮肤的氧化应激状态^[22]。本研究结果表明,RCP 能够有效缓解 UVB 诱导的光损伤小鼠体内的氧化应激,从而恢复氧化与抗氧化之间的平衡,与上述研究结果相吻合。

氧化应激与炎症反应密切相关,持续的氧化应激状态会诱导炎症因子的异常增多。其中, TNF- α 可促进其他炎症因子的合成和释放,进而诱导炎症级联放大反应,加重皮肤损伤,而 IL-6 会进一步刺激 MMPs 的表达^[27-29]。在正常皮肤中,ECM 相关分子如 I 型、III 型胶原纤维和弹性蛋白等的合成与分解处于动态平衡,以维持皮肤结构^[30]。MMPs 属于内源性蛋白酶中的一类物质,其中, MMP-1 是一种间质胶原酶,会降解 I 型及 III 型胶原纤维; MMP-3 是一种基质溶解酶,可以促进 MMP-1 的活

性,进一步将胶原分解成碎片^[31-32],从而引起皮肤皱纹。研究表明,石斛多糖可降低 UVB 诱导的光损伤小鼠皮肤组织中 TNF- α 和 IL-6 的水平,减少炎症细胞的聚集,进而缓解红斑和肿胀,还可抑制小鼠皮肤组织中 MMP-1、MMP-3 和 MMP-9 的表达,从而维持皮肤胶原纤维和结构的完整性,缓解 UVB 诱导的皮肤光损伤^[25]。本研究结果显示,RCP 通过降低炎症因子和 MMPs 含量,有效缓解了 UVB 诱导的皮肤光损伤。

综上所述,RCP 可以缓解氧化应激,降低小鼠皮肤组织中基质金属蛋白酶和炎症因子的含量,从而减轻 UVB 辐射导致的 BALB/c 小鼠皮肤光损伤。由此可见,RCP 可作为一种潜在的天然抗光损伤物质应用于护肤领域,但 RCP 抗 UVB 辐射的深层次作用机制还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHAO K, QIAN C, QI L M, et al. Modified acid polysaccharide derived from *Salvia przewalskii* with excellent wound healing and enhanced bioactivity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263: 129803-129815.
- [2] XIE M H, JIANG Z B, LIN X Y, et al. Application of plant extracts cosmetics in the field of anti-aging[J]. *Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology*, 2024, 1(2): 100014-100025.
- [3] 刘泽坤, 贺小芳, 洪颖, 等. 山药多糖延缓秀丽隐杆线虫衰老的药效评价及作用机制研究[J]. *世界中医药*, 2024, 19(4): 473-480.
- [4] 张舒婷, 李丽, 丁依琳, 等. 铁皮石斛多糖的提取及在美白保湿护肤品中的应用[J/OL]. *精细化工*, 1-12 [2024-12-18]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20240620>.
- [5] YANG J W, FAN G B, TAN F, et al. The role and safety of UVA and UVB in UV-induced skin erythema[J]. *Frontiers in Medicine*, 2023, 10: 1163697.
- [6] 闫雨, 张桂芳, 夏萌华, 等. 绞股蓝多糖提取条件优化及对 UVB 辐射损伤的保护作用[J]. *黄河科技学院学报*, 2021, 23(8): 76-81.
- [7] WANG S H, CHEN Y S, LAI K H, et al. *Prinsepiae nux* extract activates NRF2 activity and protects UVB-induced damage in keratinocyte[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(9): 1755.
- [8] SUN Q R, FANG J X, WANG Z W, et al. Two *Laminaria japonica* fermentation broths alleviate oxidative stress and inflammatory response caused by UVB damage: photoprotective and reparative effects[J]. *Marine Drugs*, 2022, 20(10): 650.

- [9] KIM H J, KIM D, KIM N Y, et al. Anti-wrinkle and anti-inflammatory effects of a combination of topically applied horse oil and dietary enzyme hydrolysates from horse bone[J]. *Process Biochemistry*, 2020, 90: 257–267.
- [10] ZHOU Y L, BAI R N, HUANG Y E, et al. The anti-photoaging effect of C-phycoerythrin on ultraviolet B-irradiated BALB/c-nu mouse skin[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023, 11: 1229387.
- [11] YANG M H, HWANG S T, UM J Y, et al. Cycloastragenol exerts protective effects against UVB irradiation in human dermal fibroblasts and HaCaT keratinocytes[J]. *Journal of Dermatological Science*, 2023, 111(2): 60–67.
- [12] HU S H, HUANG J H, PEI S Y, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharide inhibits UVB-induced melanogenesis by antagonizing cAMP/PKA and ROS/MAPK signaling pathways[J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2019, 234(5): 7330–7340.
- [13] HU J H, YAO W Z, CHANG S Y, et al. Structural characterization and anti-photoaging activity of a polysaccharide from *Sargassum fusiforme*[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111267–111275.
- [14] 尹蓉, 霍辰思, 张倩茹, 等. 树莓的功能性成分及其影响因素[J]. *中国果菜*, 2020, 40(5): 65–70.
- [15] 连欢欢, 张桂萍, 才让旦周, 等. 青海省树莓产业发展现状的调查研究[J]. *青海草业*, 2023, 32(4): 63–67.
- [16] 王惠. 乳酸菌发酵树莓汁工艺及其抗氧化、抗肿瘤活性研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [17] 李戈, 张烁. 树莓果肉多糖提取工艺优化及其抗疲劳作用[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(11): 112–120.
- [18] 田文慧, 杨永晶, 吴云, 等. 树莓果肉多糖在1型糖尿病大鼠中的免疫调节和抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 102–108.
- [19] 徐丽萍, 王鑫, 吴媛媛. 红树莓多糖降血脂作用[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(22): 293–297.
- [20] 尹星星, 王学红, 田文慧, 等. 树莓粗多糖对UVB诱导HaCaT细胞光损伤的防护作用[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2022, 38(10): 1359–1369.
- [21] 朱艳, 李先芝, 严玲, 等. 苯酚-硫酸法测定保健酒中多糖含量的分析研究[J]. *酿酒科技*, 2023(2): 118–121, 127.
- [22] LONG Y L, WANG W J, ZHANG Y Y, et al. *Dendrobium nobile* lindl polysaccharides attenuate UVB-induced photodamage by regulating oxidative stress, inflammation and MMPs expression in mice model[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2023, 99(5): 1269–1281.
- [23] GUO Y, KONG Y, SUN J, et al. Alleviation of ultraviolet-B radiation-induced photoaging using *Saussurea medusa* Maxim polysaccharide[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2024, 100(3): 622–632.
- [24] DENG M G, WANG J, LI Y L, et al. Impact of polyphenols extracted from *Tricholoma matsutake* on UVB-induced photoaging in mouse skin[J]. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 2022, 21(2): 781–793.
- [25] YE Y H, JI D S, YOU L J, et al. Structural properties and protective effect of *Sargassum fusiforme* polysaccharides against ultraviolet B radiation in hairless Kun Ming mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 43: 8–16.
- [26] CHEN Y Y, LIU X, LEI X J, et al. *Premna microphylla* Turcz pectin protected UVB-induced skin aging in BALB/c-nu mice via Nrf2 pathway[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 215: 12–22.
- [27] KIM S H, YUM H W, KIM S H, et al. Topically applied taurine chloramine protects against UVB-induced oxidative stress and inflammation in mouse skin[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(6): 867.
- [28] NGO H T T, HWANG E, SEO S A, et al. Mixture of enzyme-processed *Panax ginseng* and *Gastrodia elata* extract prevents UVB-induced decrease of procollagen type 1 and increase of MMP-1 and IL-6 in human dermal fibroblasts[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2020, 84(11): 2327–2336.
- [29] CUI X, MA Y S, WANG H, et al. The anti-photoaging effects of pre- and post-treatment of platelet-rich plasma on UVB-damaged HaCaT keratinocytes[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2021, 97(3): 589–599.
- [30] QU L P, WANG F F, CHEN Y Y. Protective effect and mechanism research of *Phyllanthus emblica* Linn. fruit extract on UV-induced photodamage in keratinocytes[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2023, 22(8): 1945–1959.
- [31] NOH E M, LEE G, LIM C H, et al. Protective effects of *Evodiae Fructus* extract against ultraviolet-induced MMP-1 and MMP-3 expression in human dermal fibroblasts[J]. *Journal of Herbal Medicine*, 2022, 35: 100586–100606.
- [32] YANG M, TAO L, WANG Z L, et al. The mechanism of peach gum polysaccharide preventing UVB-induced skin photoaging by regulating matrix metalloproteinase and oxidative factors[J]. *Molecules*, 2023, 28(10): 4104.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维