高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

芍药籽油乳液的构建及对小鼠皮肤光损伤的修复作用

郭　爽[1,2]，张　硕[1,2]，韩櫂濂[1,2]，张　梅[3]，朱　鹤[1,2]，程志强[1,2]

（1. 吉林农业大学资源与环境学院，
2. 吉林省特色资源健康产品与医用材料科技创新中心，
3. 植物保护学院、菌物学院，长春 130118）

摘要　通过建立中波紫外线(UVB)诱导的小鼠皮肤光损伤模型，系统评估了芍药籽油乳液(PSOE)的光损伤修复作用. 采用Franz扩散池法比较了PSOE与纯芍药籽油(PSO)的皮肤渗透与滞留性能；通过测定细胞内活性氧(ROS)水平评价了其抗氧化能力；建立动物模型以观察皮肤愈合情况、红斑程度及弹性变化，并开展了组织病理学分析(HE与Masson染色)及分子检测(ELISA与免疫组化法检测TNF-α，IL-1β，IL-6和MMP-1表达). 实验结果表明，PSOE的皮肤累积渗透量比PSO提升约1.5倍，皮肤滞留率提高约4倍；其清除UVB诱导ROS的能力显著优于市售乳液(CE)及空白乳液基质(EB). 动物实验结果表明，PSOE处理组创面愈合率在第7 d达(92.31±3.53)%，真皮层炎症细胞浸润减少，表皮厚度恢复近正常水平，胶原纤维密度增加. 分子检测结果表明，PSOE使TNF-α，IL-1β，IL-6及MMP-1的表达下调. 综上所述，PSOE可通过增强透皮递送、抑制氧化应激、减轻炎症反应、促进胶原再生及调节基质代谢等多途径协同作用，实现对UVB诱导皮肤光损伤的有效修复.

关键词　芍药籽油；乳液；光损伤；胶原沉积；炎症因子

中图分类号　O629；R758.14　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20250404

Construction of Peony Seed Oil Emulsion and Its Repair Effect on Photodamage of Mouse Skin

GUO Shuang[1,2], ZHANG Shuo[1,2], HAN Zhaolian[1,2], ZHANG Mei[3],
ZHU He[1,2*], CHENG Zhiqiang[1,2]

(*1. College of Resources and Environment*,
2. Jilin Provincial Innovation Centre for Health Products and Medical Materials from Local Resources,
3. College of Plant Protection, *College of Mycology*, *Jilin Agricultural University*, *Changchun* 130118, *China*)

Abstract　By establishing a UVB-induced mouse skin photodamage model, the photodamage repairing effect of peony seed oil emulsion(PSOE) was systematically evaluated. In this work, the Franz diffusion cell method was used to compare the skin penetration and retention properties of PSOE and pure peony seed oil(PSO). The antioxidant capacity was evaluated by measuring the intracellular reactive oxygen species(ROS) level. An animal model was established to observe skin healing, erythema degree, and elasticity changes, and histopathological analysis(HE and Masson staining) and molecular detection(ELISA and immunohistochemistry to detect the expression of TNF-α, IL-1β, IL-6, and MMP-1) were carried out. The experimental results showed that the cumulative skin penetration

收稿日期：2025-12-29. 网络首发日期：2026-02-04.
联系人简介：朱　鹤，女，博士，副教授，主要从事天然产物化学及应用方面的研究. E-mail：zhuhe311@jlau.edu.cn
基金项目：吉林省科技厅科技发展计划项目(批准号：20230204018YY)资助.
Supported by the Science and Technology Development Program of the Science and Technology Department of Jilin Province, China (No.20230204018YY).

amount of PSOE was approximately 1.5 times higher than that of PSO, and the skin retention rate increased by about 4 times. Its ability to scavenge UVB-induced ROS was significantly better than that of the commercial emulsion (CE) and the blank emulsion base (EB). Animal experiments indicated that the wound healing rate of the PSOE treated group reached (92.31±3.53)% on the 7th day. The infiltration of inflammatory cells in the dermis decreased, the epidermal thickness recovered to nearly the normal level, and the density of collagen fibers increased. Molecular detection results showed that PSOE down-regulated the expression of TNF-α, IL-1β, IL-6, and MMP-1. In conclusion, PSOE effectively repairs UVB-induced skin photodamage through multiple synergistic pathways, including enhancing transdermal delivery, inhibiting oxidative stress, reducing the inflammatory response, promoting collagen regeneration, and regulating matrix metabolism.

Keywords Peony seed oil; Emulsion; Photodamage; Collagen deposition; Inflammatory response

皮肤作为人体抵御外界环境的首道生理屏障，长期暴露于多种压力源之下[1,2]. 中波紫外线(Ultraviolet B, UVB)作为紫外线辐射的重要组成部分，是引起皮肤损伤的关键外部因素[3]. UVB能够直接渗透至表皮层，促使活性氧(Reactive oxygen species, ROS)显著增加，引发氧化应激、DNA损伤、炎症反应以及胶原蛋白分解，从而导致皮肤光老化、红斑现象及免疫功能下降，甚至增加患皮肤癌的风险[4-6]. 随着臭氧层稀薄和生活方式的改变，人类接触UVB的机会日益增多，开发安全有效的策略来修复UVB诱导的皮肤损伤已成为皮肤医学、化妆品科学和营养学领域的研究热点[7]. 当前，尽管市场上已有多种化学合成的修护产品，消费者却越来越青睐来源天然、安全性高且具备多重功效的活性成分[8]. 在此背景下，从植物资源中发掘兼具抗氧化、抗炎及光防护作用的天然产物，已逐渐成为研究热点.

芍药作为传统中药材，其根部(白芍或赤芍)的药用价值已广为人知，而芍药籽作为加工副产物，其资源潜力直到近几年才引起重视[9]. 研究[10,11]显示，芍药籽油(Peony seed oil, PSO)营养丰富，尤其以高比例的不饱和脂肪酸(含量超过80%)为主要特征，其中α-亚麻酸作为人体必需的Omega-3脂肪酸占有较大比例. 此外，该油脂还富含天然维生素E、植物甾醇和多酚等活性成分. 这些物质共同作用，使PSO表现出优异的抗氧化、抗炎及细胞调节功能，表明其在缓解氧化应激引起的皮肤损伤方面可能具备良好的应用前景[12]. 然而，目前关于PSO的研究多集中于提取工艺、成分分析及初级的体外抗氧化活性评价，其在皮肤领域的深入应用，特别是针对UVB这类特定损伤因子的修复作用及其分子机制的研究尚处于起步阶段，缺乏系统性的体内外实验证据. 阐明PSO对UVB诱导的皮肤屏障破坏、炎症浸润和胶原代谢紊乱的改善效果，对于挖掘其高附加值应用、开发新型天然源性的皮肤光保护剂具有重要的理论意义和应用前景. 然而，其较差的皮肤渗透性和滞留率限制了外用功效的充分发挥. 因此，将其制成乳液是提升递送效率与生物利用度的可行策略[13].

本文旨在系统评价芍药籽油乳液(PSOE)对UVB诱导皮肤损伤的修复作用与机制. 通过建立HaCaT细胞与KM小鼠光损伤模型，从透皮行为、氧化应激、炎症反应及胶原代谢等方面展开研究，重点阐明该乳液在促进活性成分渗透、减轻炎症浸润、抑制基质降解及加速屏障修复等方面的综合效应，从而为开发高效的天然光保护制剂提供理论依据与应用参考.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

芍药籽油(芍药籽自提)，芍药籽购自珲春松树农业科技有限公司；市售乳液(薇诺娜修护霜)，购自薇诺娜官方旗舰店；异硫氰酸荧光素(FITC，分析纯)，美国Sigma-Aldrich公司；高糖培养基(DMEM)、胎牛血清(FBS)和青霉素-链霉素双抗溶液(Penicillin-Streptomycin)，美国HyClone公司；肿瘤坏死因子-α抗体(TNF-α)、白细胞介素-1β抗体(IL-1β)、白细胞介素-6抗体(IL-6)和基质金属蛋白酶-1抗体(MMP-1)，武汉三鹰生物技术有限公司；活性氧检测试剂盒(DCFH-DA)，北京索莱宝科技有限公司；司盘80、甘油、异硬脂酸异丙酯、单硬脂酸甘油酯、硬脂酸、羊毛脂、吐温60、1,3-丁二

醇、尿囊素、透明质酸钠和卡波姆，分析纯，北京索莱宝科技有限公司.

TL20W/01型UVB照射灯，美国Philips公司；Axio Scope. A1型荧光显微镜，德国Carl Zeiss公司；BIOCUT型石蜡切片机，德国Leica公司；JY-SPAT型电泳槽，北京君意东方电泳设备有限公司；Franz垂直扩散池系统，上海玉博生物科技有限公司.

1.2 实验过程

1.2.1 PSO乳液的制备 首先，按质量分数(ω)分别称取3%司盘80、3%甘油、1%异硬脂酸异丙酯、1%单硬脂酸甘油酯、1%硬脂酸和7%羊毛脂，于70 ℃熔融混合均匀制得油相；另取2%吐温60、2%1,3-丁二醇、0.5%尿囊素、0.3%透明质酸钠和0.2%卡波姆，分散于75.2%超纯水中，于70 ℃溶解制得水相. 将水相缓慢加入油相中，于70 ℃，500 r/min转速下剪切乳化5 min，再加入0.8%泥泊金甲酯继续乳化3 min，得到空白乳液基质. 最后，向乳液基质中加入3%PSO，于500 r/min转速下继续搅拌3 min使PSO均匀分散，即得PSO乳液.

1.2.2 PSO乳液的透皮率和保留率测定 采用FITC荧光标记的芍药籽油(FITC-PSO)，利用Franz扩散池评估其透皮行为. 将新鲜剥离的裸鼠背部皮肤置于预冷的无菌平皿中，用无菌镊子与剪刀配合，于皮下组织层小心分离并去除附着于真皮层下方的脂肪与结缔组织. 操作过程中保持真皮层完整，避免损伤表皮结构. 处理完毕，将组织展平，用无菌圆形打孔器(直径约2.0 cm)垂直均匀裁切，获得圆形皮肤片备用. 将皮肤固定于扩散池中，角质层朝向供给室. 在供给室中加入FITC-PSO，接收室中填充预热的PBS缓冲液(pH=7.4)并持续搅拌以维持漏槽条件，将系统恒温37 ℃，分别于预设时间点(2，4，6，8，12和24 h)采集接收液样品并补充等体积PBS缓冲液；通过测定药物浓度计算单位面积累积渗透量，绘制渗透曲线，其稳态段斜率即为稳态透皮速率. 实验结束后，清洗皮肤表面，将皮肤组织匀浆、离心，取上层清液测定皮肤滞留量，并按下式计算滞留率(Retention，%)：

$$\text{Retention}=(c\times V/A)\times 100\% \tag{1}$$

式中：c(μg/mL)为皮肤溶出液中FITC-PSO的浓度；V(mL)为溶出液体积；A(μg)为投药总剂量.

根据测定的药物浓度，按下式计算单位面积累积渗透量Q_n(μg/cm^2)：

$$Q_n=(V_r\times c_n+\sum_{i=1}^{n-1}V_s\times c_i)/A \tag{2}$$

式中：V_r(mL)为接收室体积；c_n(μg/mL)为第n个时间点接收液的药物浓度；V_s(mL)为每次的取样体积；c_i(μg/mL)为第i个时间点的药物浓度；A(cm^2)为皮肤的有效渗透面积.

1.2.3 HaCaT细胞模型的建立 人永生化角质形成细胞在由高糖培养基(H-DMEM)，10% FBS和1%青霉素-链霉素组成的完整培养基中培养，在37 ℃，5%CO_2恒温培养箱中培养细胞. 用UVB灯进行辐照，将培养板置于辐照源下方10 cm处，使用紫外辐照计在板面位置预先测量并校准功率密度，辐照25 min，总剂量为200 mJ/cm^2，在辐照期间用PBS代替完整的培养基，建立光损伤细胞模型[13,14].

1.2.4 荧光探针法检测各组细胞中ROS水平 将辐照处理过的细胞分为5组：空白组(Control)、模型组(Model)、市售乳液组(CE)、乳液基质组(EB)和PSO乳液组(PSOE)；在无血清的H-DMEM培养基中培养空白组和模型组细胞，其余组分别加入CE，EB和PSOE处理光损伤细胞. 辐照后用药物治疗培养24 h，细胞内ROS水平参考文献[15]方法，并依据DCFH-DA检测试剂盒说明书进行测定. 在荧光显微镜下观察荧光强度，并采集图像用于分析.

1.2.5 KM小鼠光损伤模型的建立 研究对象为8周龄的雌性KM小鼠. 将小鼠的背部剃光并脱毛，固定面积，大小为2.5 cm×3.0 cm，将窄谱UVB灯置于小鼠正上方30 cm处，使辐射强度稳定在0.24 mW/cm^2，每天照射13 min，连续照射3 d(557.7 mJ/cm^2)以建立皮肤光损伤模型[16]. 实验分为5组：Control，Model，CE，EB和PSOE，除Control组外，其余4组均进行UVB照射.

1.2.6 小鼠创面修复 在光损伤小鼠建模后，进行修复创面实验. 对小鼠在每天9:00和17:00分别涂抹CE，EB和PSOE 2次并拍照.

1.2.7 HE和Masson染色实验 为观察各组小鼠皮肤组织病理形态表现，进行了HE和Masson染色实验. 末次给药24 h后处死小鼠，切除再生皮肤样本. 用4%甲醛固定48 h，用梯度浓度的乙醇(体积分

数30%，50%，60%，70%，90%和100%)脱水，然后包埋石蜡．制备厚度为5 μm的组织切片，并用HE和Masson染色后，采用光学显微镜观察和拍摄图像．

1.2.8 ELISA炎症细胞因子的定量分析 为定量测定小鼠皮肤组织中促炎细胞因子的水平，首先采集样本并在4 ℃预冷裂解缓冲液中充分裂解2 h；离心后收集蛋白上层清液，按照制造商说明书进行酶联免疫吸附试验(ELISA)．将样本与标准品依次加入预包被的检测微孔板中，经过指定孵育和洗涤步骤后，依次加入生物素化检测抗体、HRP标记链霉亲和素及底物溶液以启动比色反应．随后，使用酶标仪在450 nm波长处测定各孔的吸光度值，最终浓度TNF-α，IL-1β和IL-6，MMP-1均通过标准曲线精确计算得出．

1.2.9 统计学分析 采用GraphPad prism 10.6软件进行统计分析，结果以至少3次独立实验的平均值±标准差(SD)表示．多组间样本均数比较采用单因素方差分析，组间样本均数两两比较采用t-test检验．

2 结果与讨论

2.1 PSOE的渗透率和保留率

在当前环境污染加剧及紫外线辐射持续增多的背景下，皮肤光损伤问题日益严重，长期或短期暴露可引发氧化应激、炎症反应及光老化等一系列病理改变[17]．芍药籽油作为一种天然植物油脂，富含不饱和脂肪酸和生物活性成分，因其优异的抗氧化与抗炎活性，在修复光损伤方面展现出潜力．然而，其较差的皮肤渗透性与滞留率限制了其功效的发挥．为此，本研究将PSO制成乳液，旨在提升其皮肤递送效率，并在此基础上，采用光损伤小鼠模型在细胞层面初步评价了其治疗作用．采用Franz扩散池模型评估了PSOE的透皮递送能力，结果如表1所示．与纯芍药籽油(PSO)组相比，将其制备为乳液后，其渗透率提升至2.12%，约为纯PSO的1.5倍．更重要的是，PSOE的皮肤保留率显著提高至18.53%，达到纯PSO的4倍．以上结果表明，将PSO制备成乳液可有效促进其经皮渗透，并显著增加在皮肤组织中的滞留，为更有效地发挥PSO的活性提供了关键依据．

Table 1 Permeation rates and retention rates of PSO and PSO emulsion*

Group	Permeation(%)	Retention(%)
PSO	1.41±0.22^b	4.63±0.23^b
PSOE	2.12±0.13^a	18.53±0.34^a

* n=6. The letters a and b indicate significant differences(P<0.05). a represents the highest value, b is the second-highest.

2.2 PSOE对细胞内ROS水平的抑制作用

通过UVB照射可诱导细胞内产生大量ROS．过量的ROS会破坏细胞氧化还原平衡，引发氧化应激反应，进而导致光老化和皮肤炎症[18,19]．ROS荧光强度测定结果如图1和2所示．可见，与Control组相比，Model组的荧光强度显著升高，表明光损伤模型诱导了氧化应激．与Model组相比，CE组、EB组及PSOE组的荧光强度均显著降低，其中PSOE组的抑制效果最为显著．结果表明，PSOE可有效抑制光损

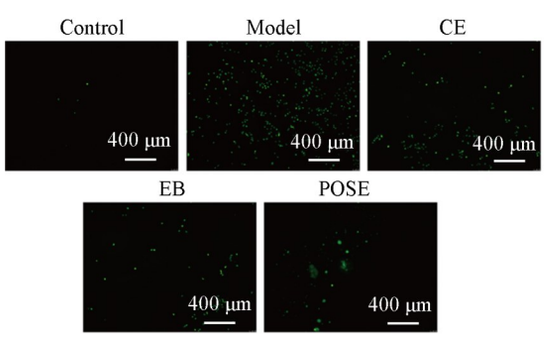


Fig. 1 Detection of ROS levels using the DCFH-DA fluorescent probe method

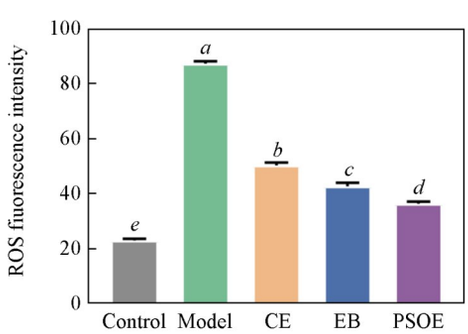


Fig. 2 Fluorescence intensity of ROS in each group

n=3. The letters a—e indicate significant differences (P<0.05). a represents the highest value, b is the second-highest, and so on.

伤皮肤中ROS的过度生成，具有较强的抗氧化能力.

2.3 PSOE对光损伤小鼠皮肤的修复效果

皮肤长期暴露于外界环境刺激(特别是紫外线辐射)是诱发光损伤的主要原因. 该过程不仅破坏皮肤屏障，引发红斑及弹性丧失等症状，更在分子层面诱导持续的氧化应激与炎症级联反应，最终加剧细胞外基质降解与修复功能障碍[18,20]. 如图3所示，Control小鼠皮肤呈现光滑、平整且富有弹性的生理状态，未见明显红肿或瘢痕形成；而光损伤模型组小鼠皮肤则表现出显著的红斑、充血、弹性丧失及角质硬化等典型光老化特征. 与Model组比较，CE组和EB组小鼠的角质硬化现象消退，红斑症状缓解，PSOE组皮肤弹性显著恢复，呈现快速修复的光损伤修复特征. 与Model组比较，CE组、EB组和PSOE组小鼠皮肤伤口面积显著降低. 与CE组和EB组比较，PSOE组小鼠皮肤伤口面积显著降低($P<0.05$). PSOE处理组创面愈合率在第7 d达(92.31±3.53)%，结果表明，PSOE可快速修复光损伤皮肤.

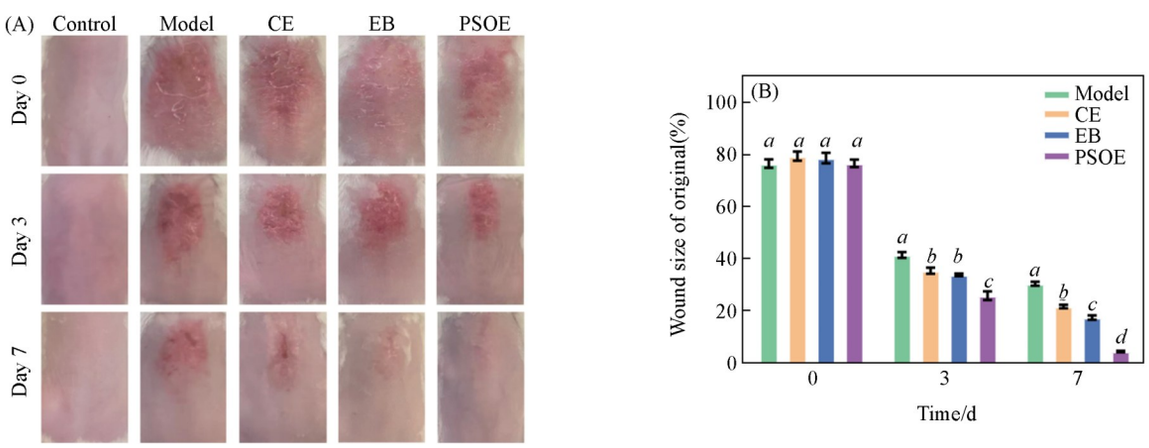


Fig. 3 Wound repair in mice (A) and wound healing rates(B) at days 0, 3, and 7

n=10. The letters a—d indicate significant differences ($P<0.05$). a represents the highest value, b is the second-highest, and so on.

2.4 PSOE对皮肤组织病理结构的改善作用

通过组织病理学评估进一步阐明了其修复特征. HE染色结果如图4(A)和图5(A)所示，可见Model组存在明显炎症浸润、表皮增厚及连接结构紊乱. 各治疗组均能改善上述状况，其中PSOE组效果最佳，表现为炎症浸润大幅减少、表皮层变薄及表皮-真皮连接恢复规则的波浪状结构，表明PSOE能有效缓解光损伤引起的皮肤炎症与异常增生.

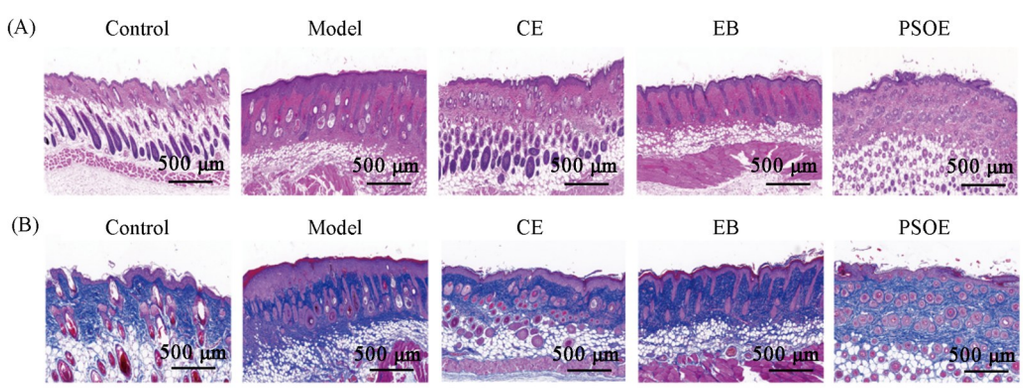


Fig. 4 Histopathological staining of skin wounds

(A) H&E staining image, with red arrow indicating epidermis; (B) Masson staining image.

Masson染色结果如图4(B)和图5(B)所示，可见Model组小鼠皮肤组织真皮层胶原纤维排列紊乱、结构松散，胶原面积显著降低. CE组、EB组和PSOE组小鼠皮肤组织纤维结构排列趋于规整，均可见胶原沉积显著增加. 与CE组和EB组比较，PSOE组小鼠皮肤组织胶原面积显著增加. 结果表明，PSOE

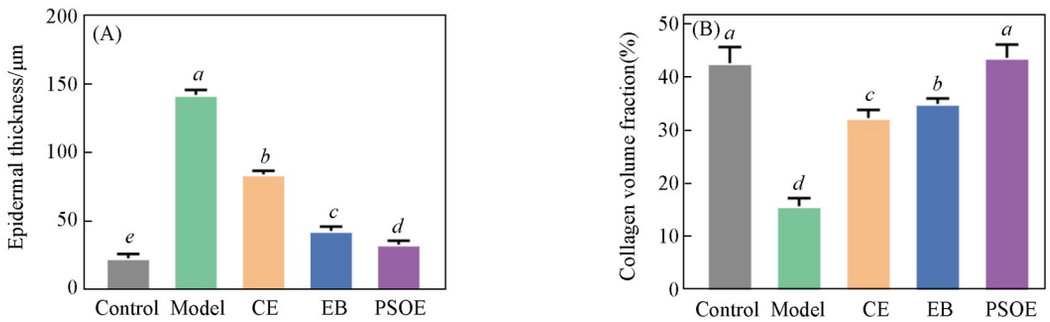


Fig. 5 Quantification of epidermal thickness(A) and quantitative analysis of collagen area based on Masson staining(B)

n=6. The letters a—e indicate significant differences (P<0.05). a represents the highest value, b is the second-highest, and so on.

能显著逆转紫外线引起的皮肤胶原降解，促进胶原纤维有序再生与沉积. 胶原沉积是组织再生的核心环节，其动态变化与纤维连接蛋白的积累密切相关[21,22]. 上述结果表明，PSOE可能通过抗炎、促进结构重塑与增强胶原合成等多重途径，协同加速光损伤皮肤的修复.

2.5 PSOE对炎症因子及MMP-1表达的调控

光损伤皮肤所处的持续性外界刺激环境易使其陷入慢性炎症的恶性循环，严重阻碍组织修复. 该过程始于显著的氧化应激，其驱动关键炎症介质(如TNF-α，IL-1β和IL-6)的过度表达[23,24]，从而引发并维持炎症状态. 同时，基质金属蛋白酶MMP-1的释放被进一步激活，不仅加剧了细胞外基质的降解，也破坏了皮肤屏障的完整性，最终共同促进光老化及相关病理变化的发展[25]. PSOE对UVB诱导的光损伤小鼠皮肤组织中TNF-α，IL-1β，IL-6和MMP-1含量的影响列于表2. 可见，Model组小鼠皮肤组织中TNF-α，IL-1β，IL-6和MMP-1的含量显著升高，与CE组和EB组比较，PSOE组的小鼠皮肤组织中TNF-α，IL-1β，IL-6和MMP-1的含量显著降低. 这表明PSO缓解光损伤的作用，与其双重调控炎症反应和基质降解过程密切相关.

Table 2 Contents of TNF-α, IL-1β, IL-6 and MMP-1 in the skin tissues of mice in each group*

Group	TNF-α/(mg·mg^{-1})	IL-1β/(mg·mg^{-1})	IL-6/(mg·mg^{-1})	MMP-1/(mg·mg^{-1})
Control	4.23±0.23^{e}	6.37±0.32^{e}	3.74±0.18^{d}	6.35±0.38^{d}
Model	12.36±0.42^{a}	16.39±0.49^{a}	14.29±0.32^{a}	15.84±0.43^{a}
CE	9.87±0.36^{b}	12.89±0.33^{b}	6.95±0.35^{b}	9.32±0.37^{b}
EB	8.34±0.25^{c}	10.23±0.24^{c}	6.13±0.26^{b}	8.23±0.63^{c}
PSOE	5.25±0.34^{d}	7.49±0.51^{d}	4.24±0.14^{c}	6.93±0.21^{d}

* n=6. The letters a—e indicate significant differences(P<0.05). a represents the highest value, b is the second-highest, and so on.

3 结　论

通过实验验证了将芍药籽油(PSO)制备成乳液剂型的科学性与必要性. 该策略不仅通过增强其皮肤渗透与滞留能力，突破了PSO自身透皮性差、生物利用度低的应用瓶颈，还在功能层面展现出多维度协同修复的优势：在氧化应激层面，可有效清除过量ROS，恢复细胞氧化还原稳态；在炎症调控层面，显著抑制TNF-α，IL-1β和IL-6等关键炎症因子的表达，减轻组织炎性浸润；在屏障结构与功能层面，能够促进表皮-真皮连接修复、抑制表皮异常增厚；在细胞外基质代谢层面，可上调胶原合成、改善纤维排列，并降低MMP-1介导的胶原降解. 综上所述，PSOE的修复作用源于其对氧化应激、炎症反应、结构重塑与基质调控的系统性干预，这种多靶点整合效应最终使其在整体层面表现出显著增强的修复效能. 因此，本研究不仅为PSO作为一种高效、安全的天然源性光损伤修复原料的应用提供了实验依据，也为相关植物活性成分的剂型化开发与转化提供了可借鉴的思路.

参 考 文 献

[1] Tan H. Y., Ren H. H., Chai J. Y., Zhai C. Z., Li T., Zhou X. Y., Lee J., Li X. M., Zhao Y. Q., *Food Rev. Int.*, **2024**, *198*, 115379
[2] Ali A., Khan H., Bahadar R., Riaz A., Asad M. H. H. B., *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2020**, *27*(23), 28730—28736
[3] Li Y. F., Han J. J., Gong R. Y., Liu Y. K., Zhou Y., Gong T. G., Wang B., Zhang L. D., Li S. D., Chen J. Y., *Int. J. Cosmet. Sci.*, **2025**, *47*(4), 652—664
[4] Wei M., He X., Liu N., Deng H., *Cell Div.*, **2024**, *19*(1), 1
[5] Neves L. M. G., Parizotto N. A., Tim C. R., Floriano E. M., Lopez R. F. V., Venâncio T., Fernandes J. B., Cominetti M. R., *Wound Repair Reged.*, **2020**, *28*(5), 645—655
[6] Martinez-Alvarado Y., Amezcua-Galvez E., Davila-Rodriguez J., Sandoval-Rodriguez A., Galicia-Moreno M., Almeida-López M., Lucano-Landeros S., Santos A., Monroy-Ramirez H. C., Armendariz-Borunda J., *Molecules.*, **2023**, *28*(7), 2929
[7] Chan L. K. W., Lee K. W. A., Lee C. H., Lam K. W. P., Lee K. F. V., Wu R., Wan J., Shivananjappa S., Sky W. T. H., Choi H., Yi K. H., *Skin Res. Technol.*, **2024**, *30*(9), e13730
[8] Cao Y. J., Xian M., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, *40*(1), 20—28
[9] Peng C. Y., Hou Y., Cheng Y., Wang X. J., *Journal of Hunan Ecological Sciences*, **2023**, *10*(2), 29—34(彭翠英, 侯艳, 程勇, 王旭军. 湖南生态科学学报, **2023**, *10*(2), 29—34)
[10] Li H. Y., Yang L., Liu J. F., Zhang S. F., Hong L., *J. Jilin Univ.*, **2025**, *51*(2), 325—332(黎涵玥, 阳莲, 刘剑锋, 张舒飞, 洪莉. 吉林大学学报(医学版), **2025**, *51*(2), 325—332)
[11] Kong F., Wu S. W., Mei X. Y., Wang E. Q., Song W. J., Wujieti B., Cui W., Li Y., Shu Q. Y., *Plant Physiol. Biochem.*, **2025**, *225*, 110018
[12] Zhao W. F., *Research on the Application of Peony Seed Oil/Meal and Paeoniflorin in Grass Carp Compound Feed*, Henan Normal University, Xinxiang, **2023**(赵伟芳. 牡丹籽油/粕和芍药苷在草鱼配合饲料中的应用研究, 新乡: 河南师范大学, **2023**)
[13] Sharkawy A., Casimiro F. M., Barreiro M. F., Rodrigues A. E., *Int. J. Biol. Macromol.*, **2020**, *147*, 150—159
[14] Sun X. S., *Research on the Preparation and Efficacy Evaluation of Yinqiao Cream for Repairing Acute Skin Photodamage*, Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin, **2024**(孙雪淞. 修复皮肤急性光损伤的银翘霜制备及其功效性评价研究, 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, **2024**)
[15] Wang Q. W., Jiang L., Lam P. L., Chui C. H., Wong W. Y., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2023**, *39*(6), 864—869
[16] Yan X. Y., Xu Y. C., Wei T., Chai Y., Li Y. X., Wang C. J., Li M. K., Zhang S., Zhu W. J., Liu Z., *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, *34*(49), 2409416
[17] Kshirsagar M. M., Chatale B. C., Dyawanapelly S., Vora L. K., Amin P. D., *Pharmaceutics*, **2025**, *17*(9), 1090
[18] Sun J. M., Liu Y. X., Liu Y. D., Ho C. K., Tsai Y. T., Wen D. S., Huang L., Zheng D. N., Gao. Y., Zhang Y. F., Yu L., *Phytomedicine*, **2024**, *130*, 155676
[19] Jiang S. C., Su B. R., Li G. W., Liu X. Y., Liu P., Yang M., Xiao J. M., Huang X. C., Wei D., Sun J., Ding J., Wu C. H., Fan H. S., *Biomaterials*, **2026**, *324*, 123496
[20] Wu T., *Research on the Mechanism of Ferroptosis in the Protection of UVB-induced Skin Photodamage by Diodon hystrix Skin Collagen*, Jilin University, Changchun, **2025**(吴婷. 铁死亡在密斑刺鲀鱼皮胶原蛋白保护UVB诱导的皮肤光损伤中的作用机制研究, 长春: 吉林大学, **2025**)
[21] Liu L. P., Li C. Y., Yang T., Wang S. R., Liu Y., Liu G. M., Cheng Z. Q., Luo Y. G., Liu Z. H., *J. Jilin Univ.*, **2024**, *50*(4), 939—946(刘丽萍, 李驰宇, 杨韬, 王少如, 刘昀, 刘国民, 程志强, 罗云纲, 刘志辉. 吉林大学学报(医学版), **2024**, *50*(4), 939—946)
[22] Xing H., Pan X. J., Hu Y. H., Yang Y. H., Zhao Z. Y., Peng H. Q., Wang J. J., Li S. Y., Hu Y. F., Li G. W., Ma D., *Acta Biomater.*, **2024**, *182*, 171—187
[23] Liu W., *Research on the Protective Effect of Chamomile Essential Oil on UVB-induced Photodamage in HaCat Cells*, Qinghai Normal University, Xining. **2023**(刘玮. 甘菊挥发油对UVB所致HaCat细胞光损伤的保护作用研究, 西宁: 青海师范大学, **2023**)
[24] Xie Y. D., Lu X.Y., Wang Z., Liu M. X., Liu L., Wang R., Yang K., Xiao H., Li J. Y., Tang X. L., Liu H. Y., *Biomater. Sci.*, **2025**, *13*(12), 3409—3409
[25] Wang N., Liu W. C., Chai G. D., Sun S. W., Ding Q. T., Cheng Z. Q., Liu X. L., Zhao Y. C., Zhao T., Wang Y., Yang J. L., Hong B., Ding C. B., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *477*, 147262

(Ed.: L, V, K)