

多种活性肽联合使用的抗老化功效评估与配方优化研究

张训庭 吴又仙

浙江康满家日用品有限公司 浙江金华 321000

【摘要】皮肤抗老化是轻工化学与化妆品领域研究热点，活性肽因温和、靶向、高效成为抗老化护肤配方核心成分。单一活性肽抗老化有局限，多种活性肽联合使用可互补增效。本研究以多种活性肽联合抗老化为核心，经理论分析与逻辑推演，探讨抗老化作用机制、协同效应原理，建立评估体系，分析影响配方稳定性与功效的关键因素并提出优化策略。研究表明，合理搭配不同活性肽可多途径协同提升抗老化效果，基质成分、pH值等因素影响活性肽稳定性与生物利用度，精准调控可优化配方功效与稳定性。本研究为多种活性肽联合抗老化护肤配方研发提供理论支撑，对推动轻工化学领域护肤产品创新发展意义重大。

【关键词】活性肽；联合使用；抗老化；功效评估；配方优化；协同效应；皮肤屏障

Study on Anti-Aging Efficacy Evaluation and Formulation Optimization of Combined Use of Multiple Active Peptides by
Zhang Xuntin Wu Youxian
Zhejiang Kangmanjia Daily Necessities Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 321000

【Abstract】 Skin anti-aging has become a research hotspot in the light chemical and cosmetics industries. Active peptides, due to their mildness, targeting ability, and high efficacy, have become core components in anti-aging skincare formulations. Single active peptide applications exhibit limitations, while combined use of multiple active peptides can achieve complementary synergistic effects. This study focuses on the combined anti-aging effects of multiple active peptides, employing theoretical analysis and logical reasoning to explore anti-aging mechanisms and synergistic principles. An evaluation system was established to analyze key factors influencing formulation stability and efficacy, with optimization strategies proposed. The research demonstrates that rational combination of different active peptides can enhance anti-aging effects through multi-pathway synergism. Factors such as matrix components and pH levels affect peptide stability and bioavailability, and precise regulation can optimize formulation efficacy and stability. This study provides theoretical support for the development of multi-active peptide-based anti-aging skincare formulations, holding significant implications for advancing skincare product innovation in the light chemical industry.

【Key words】 active peptides; combination therapy; anti-aging; efficacy evaluation; formulation optimization; synergistic effect; skin barrier

引言

随着人口老龄化和护肤意识提升，皮肤抗老化成为化妆品行业核心需求和化学重要研究方向。皮肤老化分遗传主导的内源性老化和紫外线等引发的外源性老化，后者以氧化应激为核心机制，单一干预难以全面应对，开发多靶点、协同型抗老化配方势在必行。活性肽可靶向调控皮肤细胞功能，但单一肽仅作用于老化某一环节，效果有限，多种活性肽联合可提升抗老化全面性。然而，现有研究多聚焦功效验证，缺乏协同机制系统理论分析，且在功效评估体系与配方稳定性方面研究不足，制约其应用。本研究通过理论分析与逻辑推演，系统探讨多种活性肽抗老化机制、协同原理，构建评估体系，识别关键因素，提出配方优化策略，为抗老化产品开发提供理论支撑。

一、活性肽的抗老化作用机制与分类特征

1.1 活性肽的核心抗老化作用机制

活性肽凭借小分子结构和高生物活性，可与皮肤细胞受体结合，调控信号通路与代谢过程，靶向干预老化。其作用具有多维度与特异性，主要体现为：（1）促进胶原蛋白与弹性纤维合成，激活合成通路并抑制降解，增强皮肤弹性；（2）清除自由基、抑制氧化应激，通过供电子或抑制氧化酶减轻DNA与蛋白质损伤；（3）修复皮肤屏障，促进角质层细胞增殖分化，提升锁水与防御能力；（4）抑制慢性炎症，调控炎症因子表达，缓解老化相关炎症损伤。研究表明，经修饰的活性肽（如棕榈酰化）还可增强细胞能量代谢，提升皮肤活力。

1.2 抗老化活性肽的分类及特征

按功效与靶点可分为四类：信号类（促胶原、渗透性好）、抗氧化类（含活性基团，强自由基清除能力）、修复类（强化屏障、促愈合）和舒缓抗炎类（抑制炎症因子）。各类功能互补但单一使用局限明显——如信号肽难抗氧化，抗氧化肽促胶原作用弱。因此，单一活性肽难以全面应对多因素驱

动的老化。多种活性肽联合可通过多靶点协同,实现更高效、全面的抗老化效果,已成为重要发展方向。

二、多种活性肽联合使用的协同效应原理

2.1 功效互补

多种活性肽联合的核心优势在于协同增效,即整体功效大于各组分之和,其基础是功效互补。皮肤老化涉及胶原流失、氧化损伤、屏障受损及慢性炎症等多因素,单一活性肽仅作用于单一环节,而联合使用可实现多靶点干预。例如,信号类活性肽促进胶原合成,抗氧化类清除自由基、抑制胶原降解,二者协同增强皮肤支撑力并延缓氧化老化;修复类与舒缓抗炎类联用,则同步强化屏障功能与抑制炎症,加速受损皮肤恢复。

研究表明,某些修饰型活性肽可通过改善线粒体功能,维持细胞能量代谢稳态,从而增强皮肤细胞活力,为抗老化提供基础支持。

2.2 靶点协同

不同活性肽可通过调控同一或关联信号通路实现靶点协同。例如,信号类肽激活 PI3K/Akt 通路促进细胞存活与胶原合成,而抗氧化类肽抑制 MAPK 通路减轻氧化应激诱导的凋亡,二者协同优化细胞微环境。此外,小分子修复肽可改善角质层通透性,促进信号肽渗透,提升其生物利用度,进一步放大协同效应。

2.3 分子协同

分子间可通过氢键、疏水作用等形成稳定复合物,减少降解,延长作用时间,并增强皮肤渗透性。例如,抗氧化肽与信号肽形成的复合物,其稳定性与生物活性均优于单一组分,显著提升协同效果。

需注意,协同效应依赖合理的类型选择与配比。搭配不当可能导致结构干扰、渗透受阻或功效拮抗——如某一组分过量可能抑制其他肽活性。因此,应基于作用机制与分类特征,科学设计组合方案,以实现抗老化功效最大化。

三、多种活性肽联合抗老化功效的评估体系构建

3.1 功效评估体系的构建原则

多种活性肽联合抗老化功效评估是验证协同效应与优化配方的关键。本研究以理论分析为主,强调评估体系需覆盖皮肤老化的多维机制。其构建应遵循三大原则:一是全面性,指标须涵盖皮肤弹性、皱纹、含水量、胶原含量、屏障功能等老化核心表现;二是针对性,根据活性肽类型及其协同特点,设定重点指标;三是科学性,方法需符合化妆品行业规范,逻辑严谨,为配方优化提供可靠依据。

3.2 体外功效评估指标与逻辑

体外评估以细胞实验和模拟体系为基础,核心指标包括:细胞增殖活性、胶原蛋白合成能力、自由基清除能力、皮肤屏障修复能力及炎症因子调控能力。各项指标对应不同活性肽的作用靶点,可初步验证协同潜力。

3.3 体内功效评估指标与逻辑

体内评估通过人体试用实验,贴近真实使用场景,主要检测皮肤弹性、皱纹深度与数量、角质层含水量、皮肤粗糙度及经皮水分流失量,分别反映紧致度、抗皱性、保湿力、肤质改善及屏障修复效果。

整体评估逻辑遵循“体外验证—体内验证—综合评价”路径:先通过体外实验确认活性肽对细胞功能的影响,初步判断协同性;再结合人体试验验证实际功效;最终综合分析,识别功效短板,指导配方优化。需注意,评估指标应根据具体活性肽组合动态调整,确保结果的针对性与可靠性。

四、典型活性肽 FT-41 与 pal-FT-41 的多维度功效验证与机制解析

为验证多种活性肽联合策略的可行性,本研究选取信号/修复型活性肽 FT-41 及其脂溶性衍生物 pal-FT-41 作为模型分子,通过体外细胞实验与计算模拟,从屏障修复、抗氧化、胶原合成促进及分子互作四个维度进行评估。

4.1 FT-41 与 pal-FT-41 的皮肤屏障修复及抗氧化活性评估

本实施例评估 FT-41 及其棕榈酰化衍生物 pal-FT-41 在皮肤屏障损伤修复与氧化应激抑制方面的功效。

(1) 屏障修复能力测试

用 1% SLS 处理 HaCaT 角质形成细胞建化学性屏障损伤模型,结果显示,阳性对照 1%神经酰胺混合物使细胞存活率恢复至 54.63%, 5 ppm FT-41 显著提升存活率达 82.85%, 10 ppm pal-FT-41 达 73.10%, 表明两种肽均有优异屏障修护能力,未修饰的 FT-41 效果更突出,可能与其水溶性及细胞亲和性强有关。

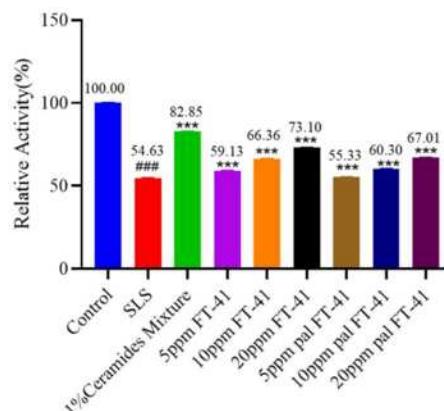


图3 活性肽 FT-41 和 pal-FT-41 在 SLS 损伤模型中的屏障修复效果

(2) 抗氧化活性测试

在 H₂O₂ 诱导的氧化应激模型中检测细胞内 ROS 水平, H₂O₂ 处理组 ROS 荧光强度高, 加入 5 ppm FT-41 后 ROS 降低, 10 ppm pal-FT-41 进一步降低, 显示出浓度依赖性的自由基清除能力, pal-FT-41 因脂溶性增强, 高浓度下抗氧化效果略优。

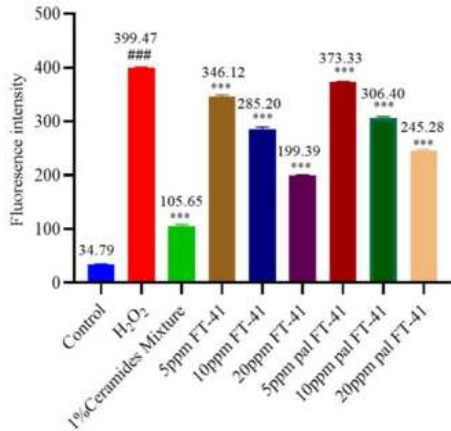


图4 活性肽 FT-41 和 pal-FT-41 对 H₂O₂ 诱导 ROS 的清除能力

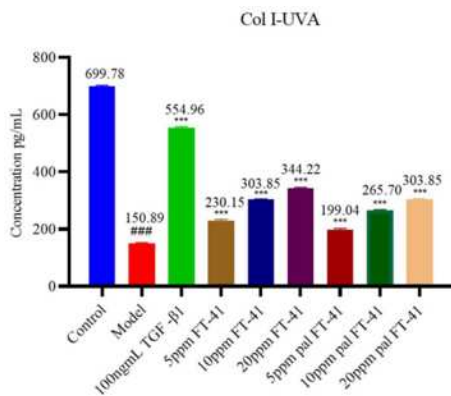


图5 FT-41 与 pal-FT-41 对 UVA 损伤 HSF 细胞 Col I 分泌的修复作用

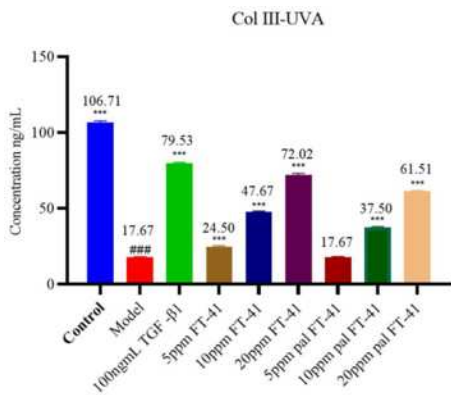


图6 FT-41 与 pal-FT-41 对 UVA 损伤 HSF 细胞 Col III 分泌的修复作用

4.2 FT-41 与 pal-FT-41 对 UVA 诱导胶原蛋白降解的修复作用

本实施例评估两种活性肽对 I 型与 III 型胶原蛋白合成

的促进能力。

用 UVA 照射人皮肤成纤维细胞建光老化模型, ELISA 检测显示, UVA 照射后, Col I 和 Col III 分泌量均骤降, 5 ppm FT-41 可使 Col I 和 Col III 分泌量显著恢复, 20 ppm pal-FT-41 也有一定恢复作用。结果表明, FT-41 可高效激活胶原合成通路, 逆转胶原流失; pal-FT-41 虽部分活性减弱, 但仍有促胶原作用。

4.3 FT-41 与 pal-FT-41 的分子对接模拟与靶点结合预测

本实施例用计算机辅助分子对接技术, 预测 FT-41 及其棕榈酰化形式与潜在抗老化靶蛋白的结合模式。

FT-41 肽链可嵌入靶蛋白活性口袋形成氢键网络; pal-FT-41 的 N 端棕榈酰基团增强疏水相互作用, 结合自由能更低。结果提示, FT-41 可激活下游信号通路促进胶原表达; pal-FT-41 的脂溶性修饰提升透皮能力和与膜相关受体的亲和力, 实现高效靶向递送。

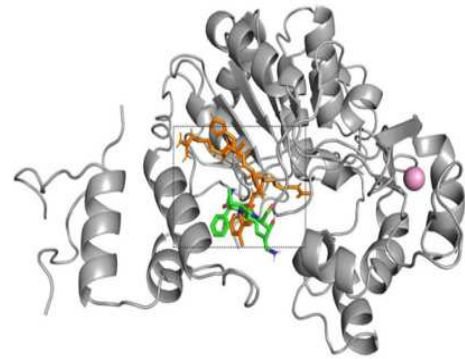


图7 FT-41 与靶蛋白的分子对接构象 (蓝色为肽链)

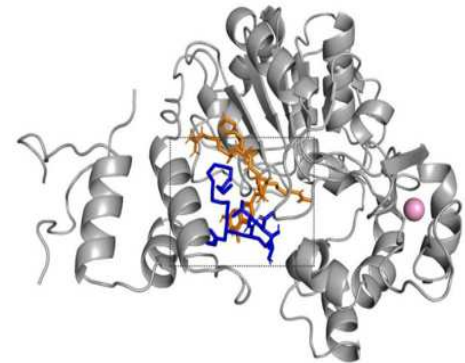


图8 pal-FT-41 与同一靶蛋白的对接构象 (绿色为肽链, 含棕榈酰基)

五、影响多种活性肽联合配方稳定性的关键因素

5.1 配方基质对稳定性的影响

配方基质是影响多种活性肽联合稳定性的重要因素。护肤配方中的水相、乳化剂和保湿剂等成分与活性肽相互作用, 显著影响其结构稳定性和分散状态。水相的纯度、pH 值及离子强度尤为关键: 杂质或重金属离子可致肽降解, pH 偏离适宜范围则破坏肽键; 多种活性肽共存时需平衡各自

pH 需求。乳化剂选择不当易引起沉淀或分层,影响均一性;部分保湿剂可通过氢键增强肽稳定性,而另一些则可能干扰其生物活性。因此,需科学设计基质体系以保障活性肽功效持续发挥。

5.2 理化因素对稳定性的影响

理化因素包括温度、光照、渗透压等,通过影响活性肽分子运动与结构稳定性影响配方整体稳定性。温度影响活性肽降解速率,高温加速降解,低温可能导致配方结晶、分层。光照尤其是紫外线会引发光降解与氧化反应,破坏活性肽分子结构。渗透压变化影响活性肽分子构象,多种活性肽联合需控制渗透压在适宜范围。

5.3 储存条件及肽类相互作用对稳定性的影响

储存条件是影响配方稳定性的外部因素,包括储存温度、湿度与光照条件。温度过高加速活性肽降解与配方变质,过低导致配方凝固、分层。湿度过高引发微生物滋生,过低导致配方干燥、结块。光照对配方稳定性影响显著,储存需避免光照,选择避光、密封包装材料。

此外,多种活性肽之间的相互作用也影响配方稳定性。部分肽类可能发生聚合反应形成复合物,部分可能发生竞争性结合,配方设计需考虑相互作用,合理选择搭配类型与比例,避免稳定性下降。

六、多种活性肽联合抗老化配方的优化策略

6.1 活性肽搭配类型与比例优化

基于协同效应原理、功效评估体系及配方稳定性影响因素,结合护肤配方研发规范,提出配方优化策略,以实现联合活性肽配方功效最大化与稳定性最优化。核心目标是在保证稳定性前提下,调控配方组分、比例及工艺,提升协同效应与生物利用度,实现抗老化效果。活性肽搭配类型与比例优化是核心,先基于分类特征与作用机制,选功效互补的活性肽搭配,优先选信号类与抗氧化类、修复类组合,可加舒缓抗炎类;再通过逻辑推演优化比例,提高核心功效肽比例,合理控制辅助功效肽比例;同时考虑分子结构兼容性,避免易相互作用的肽类组合。

参考文献

- [1] 闫健铭, 方禹鑫, 胡明阳, 等. 稳定型生物活性肽构建策略研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2025, 56(3): 183-189.
- [2] 刘一丹, 王文翠, 李玉红, 等. 3种植物精油对UVA诱导的人皮肤成纤维细胞损伤的修复作用[J]. 精细化工, 2025, 42(8): 1787-1796.
- [3] 王北明, 李瑛敏, 潘红炬. 皮肤屏障修复技术及其评价方法[J]. 日用化学品科学, 2024, 47(11): 72-76.
- [4] 秦垂新, 李文治, 唐健, 等. 活性肽抗皮肤老化作用研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(5): 63-68.

6.2 配方基质优化

配方基质优化是提升稳定性与生物利用度的保障。水相选高纯度去离子水,加缓冲剂调控pH值;乳化剂选温和、生物相容性好的,复配优化乳化效果;保湿剂选可与活性肽形成氢键的,加抗氧化剂与螯合剂提升稳定性。

6.3 理化因素与制备工艺优化

理化因素与制备工艺优化可提升稳定性与生物活性。调控理化因素,控制渗透压、反应温度与搅拌速度;采用温和制备工艺,优先选低温乳化、真空脱气等,优化均质工艺;采用微胶囊包埋技术,延缓降解,控制释放速率。

6.4 储存条件优化

储存条件优化是延长保质期、保证功效的重要环节。将配方储存于阴凉、干燥、避光处,控制温度在5-25℃,用密封、避光包装材料,加适量防腐剂,但要注意类型与浓度。

配方优化需遵循“功效优先、稳定为辅、温和安全”原则,结合功效评估体系,通过理论推演与逻辑分析,不断调整配方组分与参数,实现协同效应、稳定性与安全性的双重优化。同时,考虑消费者使用需求,优化配方质地、肤感与使用体验,确保配方发挥抗老化功效时兼具良好使用性与安全性。

七、应用前景、发展趋势与研究结论

多种活性肽联合抗老化护肤产品研发主流,广泛用于精华液、面霜、眼霜及医用修护产品。借助微胶囊包埋、复配设计等技术,可提升渗透效率与功效协同性。未来有三大趋势:一是绿色天然化,植物源、海洋源活性肽受关注;二是精准个性化,针对不同肤质定制复配方案;三是智能长效化,结合缓释技术与皮肤检测实现按需释放与动态干预。本研究系统阐明活性肽四类作用机制,揭示协同增效源于功效互补、靶点协同与分子互作,构建“体外-体内”多维评估体系,识别关键稳定性影响因素,提出全链条优化策略。虽本研究以理论推演为主,但为多肽抗老化产品开发提供重要支撑。未来需深化协同机制解析、完善评估标准,推动多肽复配技术标准化、产业化。