

泛醇-肉碱超分子低共熔物的制备及护肤性能研究

王扇珍¹, 宣晓蕊¹, 余述燕², 任钰婷², 郭大业², 樊凯奇²

1. 杭州沫润化妆品有限公司, 浙江 杭州 311215;

2. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001

摘要:【目的】针对传统泛醇制剂黏腻感强、肤感不佳的问题, 采用超分子技术对其改性并探究改性后护肤效果, 以提升应用性能与使用体验。【方法】以左旋肉碱为氢键受体, 与 D-泛醇构建超分子低共熔物, 借助傅里叶红外光谱仪、核磁共振氢谱仪和差示量热仪表征其结构, 通过理论计算揭示分子间相互作用机制, 利用流变学测试评价剪切应力及黏度变化, 进一步结合转录组学分析与配方应用研究, 明确护肤性能。【结果】成功制备泛醇-肉碱低共熔物, 其超分子结构由多重氢键与静电作用协同维持; 体系黏度显著降低且剪切稀化行为明显, 有效改善了黏腻肤感; 该低共熔物可上调胶原蛋白合成、细胞能量代谢相关基因, 同时抑制炎症因子表达。【结论】超分子技术可显著改善传统泛醇制剂肤感, 所得超分子泛醇-肉碱低共熔物具备明确的抗皱与抗炎活性。

关键词: D-泛醇; 左旋肉碱; 超分子; 护肤性能

中国分类号: TS974.1; TQ658.2 **文献标识码:** A

收稿日期: 2025-12-31; **修回日期:** 2026-03-16

基金项目: 河南省科技攻关项目 (252102310461); 河南省校企协同创新项目 (26AXQXT113)

作者简介: 王扇珍 (1985—), 男, 山西潞城市人, 杭州沫润化妆品有限公司工程师, 主要研究方向为功能性护肤品的开发与护肤机制研究。Email: wangsz@hangcos.com.cn

通讯作者: 余述燕 (1985—), 女, 安徽省金寨县人, 郑州轻工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为化妆品原料改性技术。Email: 2014023@zzuli.edu.cn

Preparation and skin care performance of panthenol-carnitine supramolecular deep eutectic mixture

WANG Shanzhen¹, XUAN Xiaorui¹, Yu Shuyan², REN Yuting², GUO Daye², FAN Kaiqi²

1. Hangzhou Morun Cosmetics Co., Ltd, Hangzhou 311215, China;

2. College of Materials and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,
Zhengzhou 450001, China

Abstract: [Objective] Aiming at the problems of strong greasiness and poor skin feel of traditional panthenol preparations, supramolecular technology was adopted to modify panthenol, and the skin care efficacy of the modified product was investigated, so as to improve its application performance and user experience. [Methods] L-carnitine was used as the hydrogen bond acceptor to construct a supramolecular deep eutectic solvent (DES) with D-panthenol. The structure of the DES was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, proton nuclear magnetic resonance spectroscopy and differential scanning calorimetry. Theoretical calculations were performed to reveal the intermolecular interaction mechanism, and rheological tests were carried out to evaluate the changes in shear stress and viscosity. Furthermore, transcriptomic analysis combined with formulation application research was conducted to clarify the skin care properties. [Results] The panthenol-carnitine deep eutectic solvent was successfully prepared, and its supramolecular structure was synergistically stabilized by multiple hydrogen bonds and electrostatic interactions. The viscosity of the system was significantly reduced with an obvious shear-thinning behavior, which effectively improved the greasy skin feel. Transcriptomic analysis showed that the deep eutectic solvent could up-regulate the expression of genes related to collagen synthesis and cellular energy metabolism, while inhibiting the expression of inflammatory factors. [Conclusion] Supramolecular technology significantly optimizes the skin feel of traditional panthenol preparations, and the modified panthenol exhibits definite anti-wrinkle and anti-inflammatory activities.

Key words: D-panthenol; L-carnitine; supramolecule; skin care performance

0 引言

D-泛醇 (D-panthenol) 作为维生素 B5 (泛酸) 的醇类衍生物, 具有与维生素 B5 相当的生物活性, 并且在水溶液中表现出更好的稳定性^[1]。自 1944 年被首次应用于皮肤护理以来, D-泛醇已经成为全球护肤品配方中的核心成分。得益于其小分子量 (205 Da) 与优异的皮肤渗透性, 局部使用的 D-泛醇可迅速被吸收并转化为泛酸, 进而参与脂肪酸和鞘脂的合成, 促进角质细胞能量代谢, 发挥修复皮肤屏障的功能^[2]。同时, D-泛醇还可与皮肤角质层中的脂质与蛋白残基相互作用, 促进水分子保留, 提升皮肤含水量, 实现皮肤保湿效果^[3-4]。此外, 多项研究证明 D-泛醇能影响人成纤维细胞的增殖、迁移、附着等, 加速表皮再生, 在组织修复和皮肤伤口愈合中起关键作用^[5-6]。因此, D-泛醇因对皮肤具有保湿、抗炎、屏障修护、再生及愈合等功效, 被广泛应用于医药和化妆品等领域^[7-9]。然而, 传统泛醇制剂因其多元醇结构带来的高黏性会产生强烈的黏腻感, 消费者接受度不佳。因此, 如何在不改变化学结构并保持生理活性的前提下改善使用肤感, 成为拓展其应用性能的关键。

低共熔物 (Deep Eutectic Solvent, DES) 是由两种或多种组分通过氢键等非共价分子间相互作用自组装形成的低共熔混合物^[10]。这种独特的超分子形成机制, 不仅使体系的熔点显著低于各单一组分, 还能有效改善活性成分的物理化学性质, 例如显著提升溶解度、优化润湿性与流变性, 并增强其稳定性^[11-13]。2022 年, 李明键^[14]等制备了一系列基于氨基酸-枸橼酸的 DES, 研究发现该 DES 对皮肤有更好的亲和力和渗透性; 2025 年, 周湖武^[15]等利用扁桃酸和甜菜碱形成的 DES, 有效解决了木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶的储存稳定性难题。作为一种新兴的超分子组装技术, 相较于环糊精、脂质体或微胶囊等物理改性方法, DES 具有制备工艺简便和可设计性强的优点; 相较于结构衍生等化学改性策略, DES 又具有不改变原料化学结构, 保持甚至增强生物活性的优点, 已逐渐成为化妆品领域理想的原料改性技术之一^[16-17]。

左旋肉碱（L-carnitine）作为一种天然存在于生物体内的季铵盐类化合物，其分子中含有羟基和羧基等强氢键位点，常被选作 DES 的氢键受体^[18-19]。相较于胆碱、甜菜碱等常见氢键受体，左旋肉碱不仅具备良好的生物相容性、保湿性及护肤品中的应用安全性，其季铵盐正离子中心与羧酸根基团的协同作用，或可与泛醇形成更稳定的多重氢键与静电相互作用，在降低泛醇体系黏度、改善黏腻感方面表现出更优效果；同时其自身所具有的保湿、抗氧化和抗炎等功效有望与泛醇形成护肤功效协同，使其成为化妆品相关 DES 体系中颇具潜力的组分。

基于 DES 的技术优势及左旋肉碱的特性，本研究拟采用以左旋肉碱为氢键受体，泛醇为氢键供体，以低共熔物形式制备超分子泛醇，解决泛醇高浓度使用时的黏腻感问题，并系统研究超分子泛醇的结构、相互作用方式、流变性能及其在抗衰老、抗炎方面的护肤机制及护肤效果，以期为功能性护肤成分的开发与应用提供新范式。

1.材料与方法

1.1 主要材料与试剂

D-泛醇（化妆品级别，纯度 $\geq 98.5\%$ ），帝斯曼营养产品有限公司；左旋肉碱（食品级，纯度 $\geq 98.0\%$ ），上海美焱生物科技有限公司；人原代真皮成纤维细胞、培养基、PBS 缓冲液，Lifeline 细胞科技公司；CCK 试剂，日本同仁化学研究所；TRIzol 试剂，赛默飞世尔科技公司；去离子水，郑州轻工业大学实验室自制。

1.2 主要仪器与设备

SB-5200DTD 型超声波仪，宁波新芝生物科技股份有限公司； Bruker Avance II 400 MHz 核磁共振仪，德国 Bruker 公司； TENSOR II 型傅里叶变换红外光谱仪，德国 Bruker 公司； Discovery HR-20 型流变仪、Q20 差示量热仪，美国 TA 公司； Spark 20M 型多功能酶标仪，瑞士 Tecan 公司； Corneometer CM825 型角质层水分含量测试探头、 Tewameter TMHex 型经皮水分流失率和水分蒸发热损失测试探头、 Mexameter MX18 型皮肤黑色素和血红素测试探头、 Cutometer MPA580 皮肤弹性测试仪，德国

Courage&Khazaka 公司；VISIA7 型皮肤分析系统，美国 CANFIELD 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 超分子泛醇的制备

根据相关文献^[20-21]，将 D-泛醇与左旋肉碱按照物质的量 3:1 投入反应瓶中，室温搅拌混合均匀后，缓慢升温至 80℃保温搅拌至形成均匀透明液体。制备完成后，将样品分别置于室温、4℃、-20℃及 50℃条件下观察其储存稳定性。

1.3.2 红外光谱和核磁共振光谱分析

采用傅里叶变换红外光谱仪分别采集 D-泛醇、左旋肉碱及超分子低共熔物的红外光谱图，利用溴化钾压片法制备样品，扫描范围为 400~4000 cm^{-1} ；以 $\text{DMSO-}d_6$ 为溶剂，使用核磁共振仪采集上述三个样品的 ^1H NMR 谱。

1.3.3 差示扫描量热仪分析

采用 Q20 差示量热仪对 D-泛醇、左旋肉碱、物理混合物及超分子低共熔物进行测试，分析样品的热行为差异。测试条件为：准确称量约 5 mg 样品于铝制坩埚内压制密封，同时以空坩埚作为空白参照，在氮气氛围下，以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速率从 -30 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 230 $^{\circ}\text{C}$ 测定热分析曲线。

1.3.4 D-泛醇和左旋肉碱相互作用研究

使用 CREST 程序对 D-泛醇和左旋肉碱及超分子泛醇进行构象搜索，然后在 DFT 水平对构象做结构优化和高精度单点能计算，绘制稳定结构的分子范德华表面静电势分布图，分析 D-泛醇和左旋肉碱之间的相互作用。

1.3.5 肤感评价

以志愿者试用评分的方式评价泛醇超分子化前后的使用肤感差异。招募 30 名志愿者（自觉干性、油性和中性皮肤分别为 8 人、10 人和 12 人），依次在单侧手背采用手指轻拍法和顺时针旋涂法对 7%（若无特指，百分数均指质量分数）D-泛醇溶液与

8.75%超分子泛醇溶液（等效 D-泛醇含量为 7%）进行使用肤感评测。评价指标包括：手指轻拍后提起时的拉力大小、顺时针旋涂时的摩擦力大小和皮肤表面残留感。评分标准为：拉力大小（0 分 = 不黏腻，无拉力感；5 分 = 黏腻，拉力感强）；摩擦力大小（0 分 = 不黏腻，无摩擦力；5 分 = 黏腻，摩擦力大）；残留感（0 分 = 不黏腻，无残留；5 分 = 黏腻，残留感强），所有志愿者评分结果取平均值。

1.3.6 流变特性测定

在 25 °C 条件下，采用静态流变学方法研究 D-泛醇、超分子泛醇的黏度和剪切应力随剪切速率的变化行为。实验在流动扫描模式下进行，使用直径为 25 mm 的平行板测量系统，板间间隙设定为 1 mm，平衡时间为 60 s，剪切速率范围设定为 1~1000 s⁻¹，并以对数规律递增。

1.3.7 超分子泛醇护肤机制研究

利用体外培养的正常人真皮成纤维细胞建立细胞模型，用适宜浓度的超分子泛醇样品处理细胞，提取成纤维细胞总 RNA 进行转录组测序及基础数据分析，探究样品的护肤功效及深层机制。

1) 样品灭菌处理。鉴于超分子泛醇样品为液体活性原料，采用常规高温高压灭菌可能会破坏其生物活性，本实验采用 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌法对样品进行灭菌处理。

2) 人原代真皮成纤维细胞活性测试。人原代真皮成纤维细胞在 5% CO₂、37 °C 的培养条件下，利用成纤维细胞培养基扩增培养，当细胞生长至 80%~90%汇合时，用胰酶将其消化并接种于 96 孔板。细胞在 96 孔板中贴附培养 48 h 后，配制不同浓度的超分子泛醇样品处理细胞（N=3）。处理 48 h 后，加入 CCK-8 试剂孵育 1 h，用酶标仪在 450 nm 处读取 OD 值。通过计算样品组和空白对照组的平均 OD 值之比得到相对细胞活性数值，判断样品的细胞毒性作用。

$$\text{相对细胞活性}\% = \frac{\text{样品组 } OD \text{ 值}}{\text{空白组 } OD \text{ 值}} \times 100\%$$

(2) 人原代真皮成纤维细胞的转录组测序及 RNA 样品质检

当体外培养的成纤维细胞生长至 80%~90%汇合时，用胰酶将其消化并接种于 12 孔板。细胞在 12 孔板中贴附培养 48 h 后，用适宜浓度的超分子泛醇样品处理细胞 ($N=3$)。24 h 后，吸去上清液，向每孔加入 TRIzol 试剂，充分吹打消化裂解细胞，裂解液转入-80 °C深低温保存备用。总 RNA 抽提质检合格后进行文库构建，采用 lumina Hiseg 测序平台的双端测序模式对样本进行高通量测序。

1.3.8 超分子泛醇精华液的制备及护肤效果评价

为探究改性后泛醇的应用效果，设计研制了一款以超分子泛醇为功效成分的护肤精华液，并采用人体功效评价方法，对该产品的护肤效果进行评价。

1) 超分子泛醇精华液的制备。按照如下配方：去离子水 (84.9%)、丁二醇 (5%)、超分子泛醇 (5%)、琥珀酸二乙氧基乙酯 (2.5%)、甘油葡糖苷 (1%)、1,2-己二醇 (1%)、对羟基苯乙酮 (0.5%) 和黄原胶 (0.1%)，将黄原胶分散于去离子水中加热至 80 °C 保温 20 min，再自然降温至 45 °C 待用；将对羟基苯乙酮、1,2-己二醇分散于丁二醇中，于 60 °C 溶解至无颗粒后加入上述水溶液，搅拌均匀；再依次加入超分子泛醇、琥珀酸二乙氧基乙酯和甘油葡糖苷，搅拌条件下冷却至室温即可。

(2) 超分子泛醇精华液护肤效果评价

通过对比满足入选标准的 33 名受试者单次及连续使用精华液 4 周前后皮肤含水量、经皮水分散失量 TWEL 值、皮肤红斑指数 EI 值、皮肤弹性 R2 值、皮肤紧致度 F4 值、红区面积、皱纹面积、下颌线外侧角度、下半面宽度等指标的变化情况，评价产品护肤效果。其中下颌线外侧角度采用 VISIA7 皮肤分析系统拍摄标准侧脸照，以耳垂与下颌角连线、下颌角与下巴尖连线为基准测量夹角；下半面宽度采用 VISIA7 皮肤分析系统拍摄标准正脸照，测量双侧下颌角之间的直线距离；皮肤弹性 R2 值、紧致度 F4 值采用 Cutometer MPA580 皮肤弹性测试仪，探头为 SU4，测试模式为 R1，

每次测试 5 次取平均值。

受试者入选标准为：乳酸刺痛试验阳性（总分 ≥ 3 分），皮肤泛红等级 ≥ 1 级，眼角皱纹 2~4 级、眼底细纹 2~5 级，左、右两侧脸颊 F4 均值均 >6 或 R2 均值均 ≤ 0.65 ，自认为皮肤干燥、粗糙，且年龄范围在 25~50 岁的符合试验要求的中国健康女性受试者。

3) 评价效果数据分析

应用 Excel 软件，对各个测量值进行描述性统计，包括均值、标准差、中值、最小值和最大值等；利用 SPSS 分析软件比较不同时间点的测量值与基础值，采用 Shapiro-Wilk Test 进行数据差值正态分布的显著性检验。若 p （双侧） > 0.05 ，则呈正态分布，进行配对样本 t 检验，显著性差异水平 α 取 0.05。若 p （双侧） < 0.05 ，则呈非正态分布，进行 Wilcoxon 符号秩检验，显著性差异水平 α 取 0.05。显著性标注 n.s. 表示无统计学差异；当 $p > 0.05$ 时，* 表示有显著性差异；当 $0.01 \leq p \leq 0.05$ 时，** 表示有显著性差异；当 $0.001 \leq p \leq 0.01$ 时，*** 表示有极显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 超分子泛醇的形成与表征

样品外观对比图如图1所示。由图1可知，在 80 °C 条件下，将 D-泛醇与左旋肉碱加热搅拌 2 h，可得到澄清透明的黏性液体；该液体于室温、4 °C、-20 °C 和 50 °C 分别储存 60 d 后，仍保持均匀透明，未出现固体析出或可见外观变化；而二者在室温下的物理混合物呈白色泥状，外观差异显著，初步提示超分子泛醇的成功制备。此外，选取 5 名志愿者参照 1.3.5 所述肤感评价方法，对储存 90 d 的超分子泛醇样品与新鲜制备样品进行对比评测，发现新鲜样品在拉力、摩擦力、残留感 3 项指标的评分分别为 2.5、3.2 和 2.8，储存 90 d 的样品对应评分分别为 2.7、3.1 和 2.7，二者无显著差异。上述结果表明，所制备的超分子泛醇具备良好的物理稳定性与肤感稳定性，为其后续产业化应用奠定了重要基础。



图1 样品外观对比图

Fig.1 Comparative view of the samples morphology

图2为样品的红外光谱图。由图2可知，左旋肉碱的羟基峰位于 3460 cm^{-1} 处，峰形窄而尖锐，而超分子泛醇与D-泛醇的羟基峰均出现在 3600 cm^{-1} 附近，且峰形明显宽化。羟基峰的宽化效应是羟基参与复杂分子间氢键网络的典型光谱响应，间接佐证了左旋肉碱与D-泛醇之间存在分子间氢键相互作用。进一步对比 D-泛醇与超分子泛醇的羟基峰可知，两者宽化程度相当，但超分子泛醇的羟基峰存在轻微蓝移，其原因可能是左旋肉碱与D-泛醇形成的分子间氢键并未完全破坏D-泛醇自身原有的氢键缔合状态，二者氢键网络呈现共存状态^[22]。左旋肉碱分子中羧基($\text{C}=\text{O}$)的伸缩振动峰(1700 cm^{-1}) 在低共熔物体系中红移至 1678 cm^{-1} ，该现象可归因于低共熔物形成过程中分子间氢键的增强作用，导致羰基电子云密度降低和振动频率下降。进一步分析发现，D-泛醇在 1663 cm^{-1} 处的特征吸收峰(N-H剪式振动峰)在低共熔体中显著位移至 1630 cm^{-1} ，此红移现象源于泛醇分子中N-H键参与氢键网络构建后，其键力常数发生改变，进而引起振动频率的升高^[23]。此外，超分子泛醇谱图中无新特征峰出现，表明泛醇与左旋肉碱之间没有形成新的化学键。上述光谱位移特征为阐明低共熔物体系中供体-受体分子间的相互作用机制提供了关键证据。

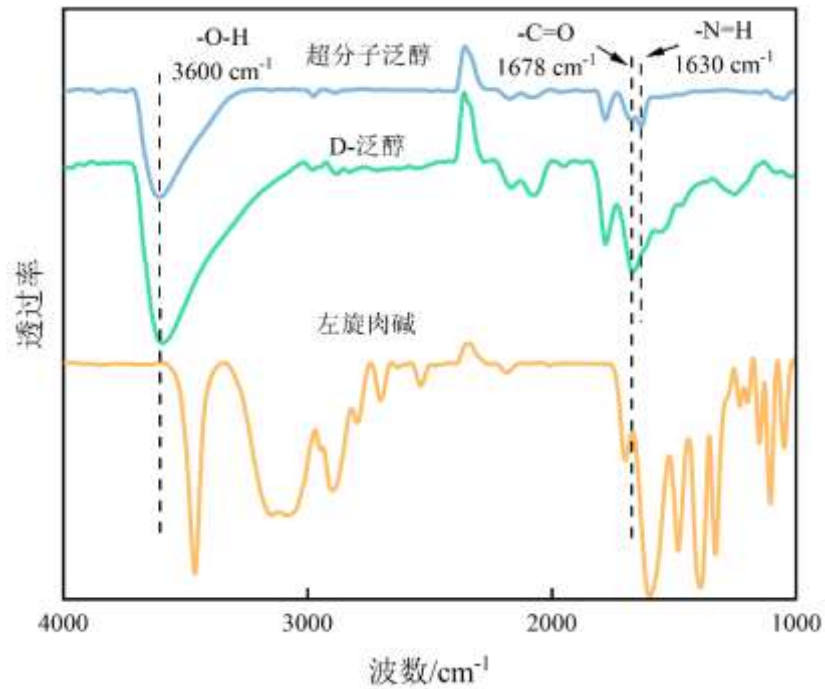


图2 样品的红外光谱图

Fig.2 FT-IR spectra of various samples

图3为样品的核磁共振氢谱。由图3可知，D-泛醇次甲基羟基氢（ $-\text{CH}-\text{OH}$ ）的信号峰由 5.37×10^{-6} 偏移至 5.69×10^{-6} ，其碳链末端亚甲基羟基氢（ $-\text{CH}_2-\text{OH}$ ）的信号峰则从 4.54×10^{-6} 移动至 4.70×10^{-6} 。这些特征峰的明显位移表明D-泛醇与左旋肉碱存在分子间相互作用，进一步证实了二者低共熔物的成功制备。

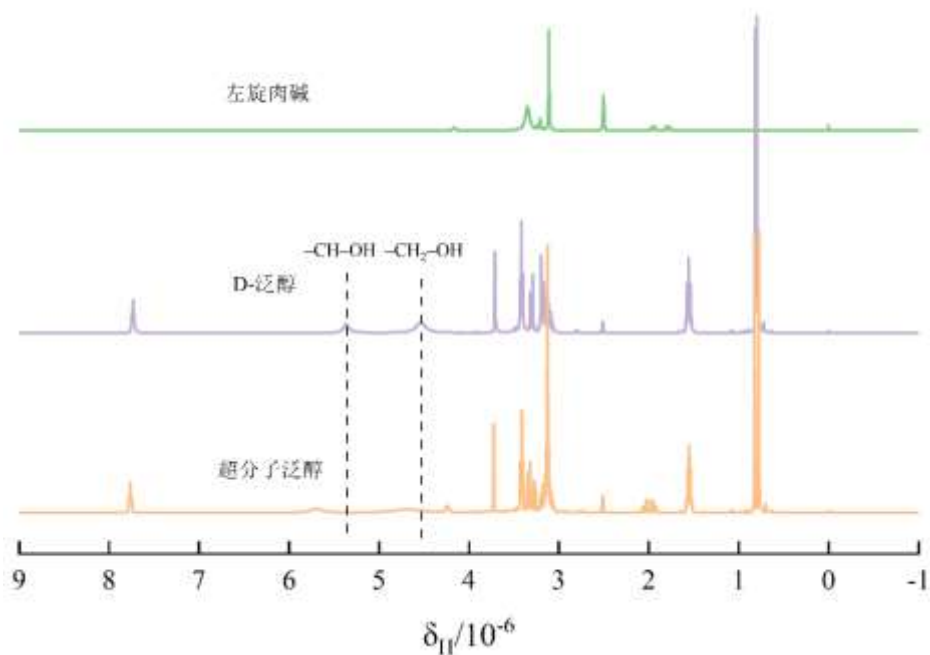


图3 样品的核磁共振氢谱

Fig.3 ^1H NMR spectra of various samples

图4为样品的DSC热分析曲线。由图4可知，纯左旋肉碱的 DSC 曲线在68 °C和207 °C处出现两个明显的吸热峰。依据热分析原理及物质相变规律，68 °C处的弱吸热峰可归因于结晶水的脱除或晶型转变；而207 °C处的强吸热峰则对应左旋肉碱晶体由固态向液态转变的熔融过程。相比之下，D-泛醇的热流曲线整体较为平缓，仅在近200 °C的高温区呈现缓慢下降趋势。两者的物理混合物 DSC 曲线未出现新的特征峰，表明其组分间仅为简单的物理分散，未发生相互作用。对比而言，超分子泛醇的DSC曲线呈现出显著差异，其在191 °C处出现一个尖锐的单熔融峰。该峰位既不同于左旋肉碱207 °C的熔融峰，也与D-泛醇及物理混合物的热转变特征明显不同。这一单一、尖锐的熔融峰有力地证明，体系中D-泛醇与左旋肉碱分子间通过氢键等非共价键相互作用，成功形成了超分子低共熔物这一新物相，从而改变了原体系的热转变行为。

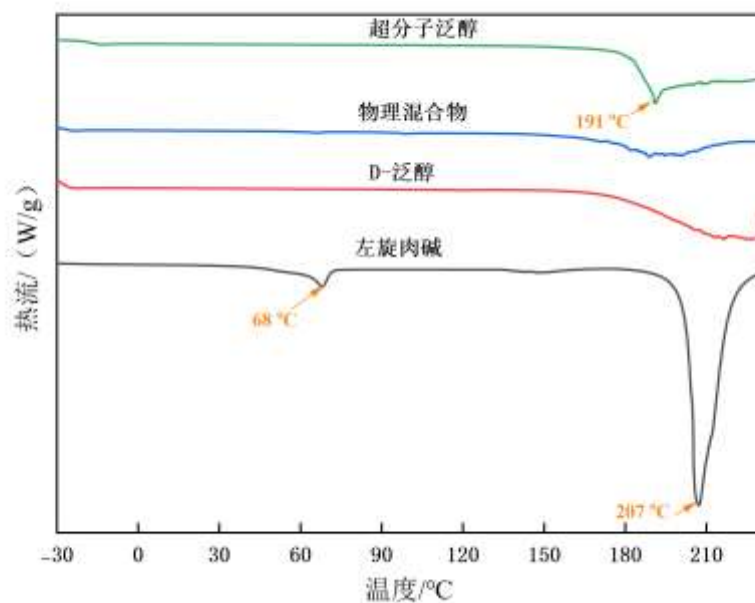


图4 样品的DSC热分析曲线

Fig. 4 DSC curves of various samples

2.2 D-泛醇和左旋肉碱相互作用研究

通过量子化学方法，从热力学和结构两个层面分析泛醇与左旋肉碱之间的相互作用。图5为泛醇与左旋肉碱相互作用构象示意图。由图5可知，在M06-2X/6-311++G(d,p)//6-31+G(d,p)水平下计算得到泛醇与左旋肉碱的结合自由能为-21.3 kcal/mol，说明两者之间有较强的相互作用，且形成过程为自发的放热过程。自由能数值高于弱相互作用及单个氢键强度，说明两者之间形成了多重、协同的强相互作用。进一步对超分子泛醇及结构进行分析（图6），泛醇的多个羟基与左旋肉碱的羧酸根之间形成了多重氢键结构，肉碱的季铵盐正离子中心与泛醇链末端的羰基氧原子之间也存在强烈的静电吸引。以上结果表明泛醇与左旋肉碱可以通过形成多重氢键与静电相互作用自发结合为低共熔物，可以推测二者可在化妆品等产品应用中发挥协同增效作用。

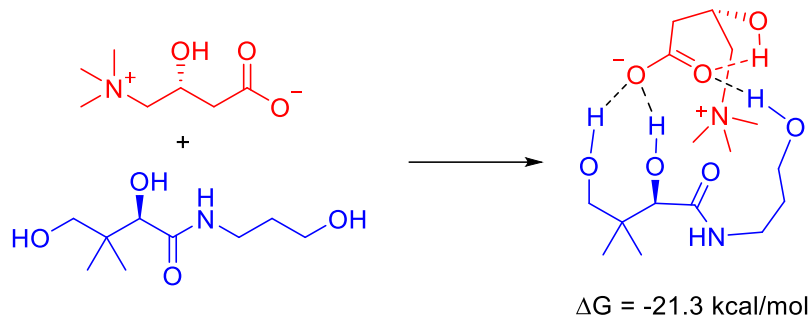
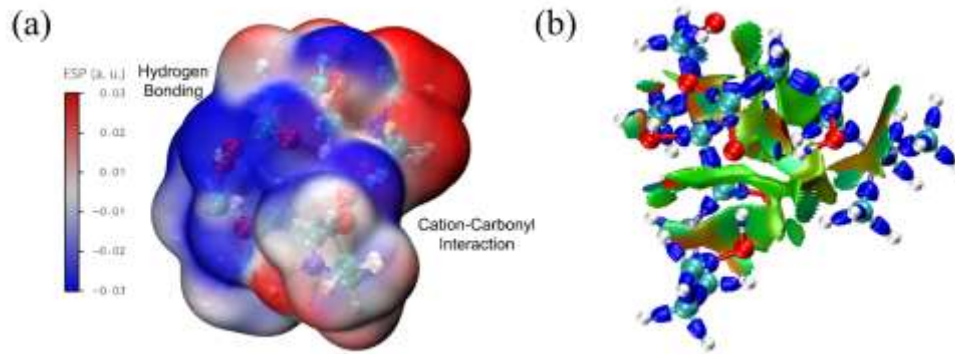


图 5 泛醇与左旋肉碱相互作用构象示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the interaction conformation between D-panthenol and L-carnitine



a) 表面静电势力分布图

b) 相互作用示意图

图 6 泛醇-左旋肉碱低共熔物表面静电势力分布及相互作用示意图

Fig. 6 Electrostatic potential distribution and schematic diagram of the interaction of the panthenol-carnitine eutectic

2.3 超分子泛醇流变学分析及肤感评价

图7为泛醇和低共熔物的流变特性曲线。由图7a)可知，泛醇与超分子泛醇的剪切应力随剪切速率不断变化，呈现先增大后下降的趋势，而且超分子泛醇的剪切应力降低更为显著。由图7b)可知，泛醇与超分子的黏度均随剪切速率的升高显著下降，这表明两者都具有假塑性流体特征和良好的触变性。随着剪切速率的增加，泛醇的分子结构被破坏程度增加，分子间作用力下降，表现出剪切稀化。对比泛醇与泛醇-肉碱低

共熔物的黏度曲线，可以发现泛醇-肉碱低共熔物的黏度大幅降低，这主要是由于泛醇与肉碱形成低共熔物，形成分子间氢键，破坏泛醇分子间的结构与网络，使超分子泛醇黏度明显降低。该测试结果表明泛醇与肉碱形成低共熔物后，泛醇的流体性状发生显著变化，有望降低其高浓度应用下的黏腻感，拓展其在化妆品产品中的应用范围和极限浓度。

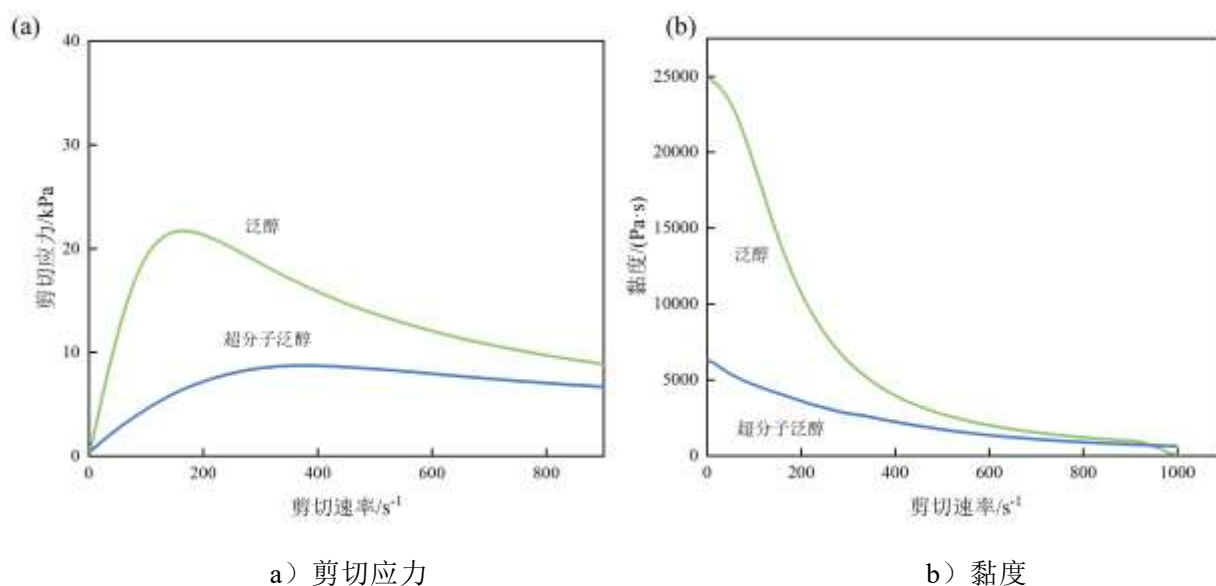


图 7 泛醇和低共熔物的流变特性曲线

Fig. 7 Rheological property curves of panthenol and eutectic: (a) shear stress; (b) viscosity

30 名志愿者的肤感评价结果显示：7% D-泛醇溶液在拉力、摩擦力、残留感 3 项指标的平均评分分别为 3.5、3.8 和 4.3；而 8.75% 超分子泛醇溶液（等效 D-泛醇含量 7%）的对应评分为 2.3、3.0 和 2.9。上述结果表明，D-泛醇经超分子化改性后，黏腻感、涂抹摩擦力与皮肤残留感均显著降低，肤感提升明显，且该结果在不同肤质志愿者中表现出良好一致性。结合流变学表征结果（体系黏度降低、剪切稀化现象更为显著），可从主观评价与客观数据两方面证实超分子泛醇的肤感改善效果。

2.4 超分子泛醇的护肤功效及作用机制

不同浓度的超分子泛醇样品对成纤维细胞处理 24 h 后，用 CCK 试剂盒检测细胞

活性，结果如 8 所示。由图 8 可知，当样品浓度高于 1% 时，表现出显著的细胞毒性；而当浓度降至 0.5% 及以下时，样品不仅无细胞毒性，还对成纤维细胞的增殖表现出促进作用，其中 0.5% 浓度下细胞相对活力为 112.3%，0.2% 浓度下细胞相对活力达到 126.9%。基于 CCK-8 实验结果，0.2%~0.5% 为该样品的最佳安全与增殖浓度窗口。考虑到后续转录组测序需要有效刺激浓度以诱导显著的基因表达变化，本研究选取安全窗口内的中间浓度 0.25% 作为转录组测序的处理浓度。

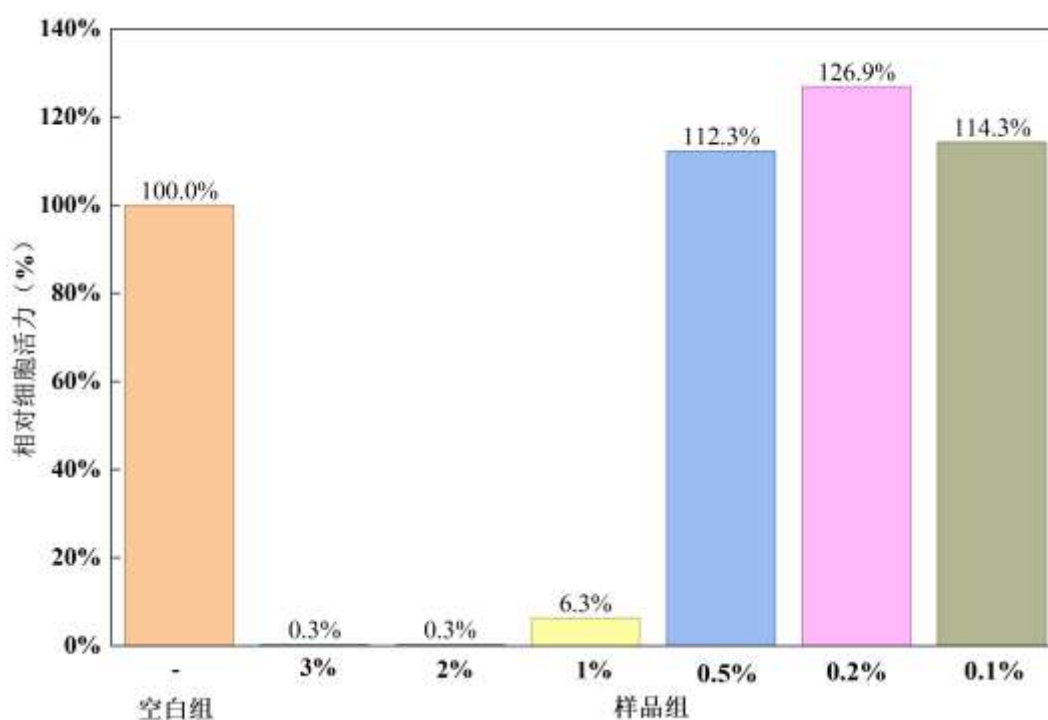


图8 不同样品浓度下人原代真皮成纤维细胞活力

Fig. 8 Viability assay of human primary dermal fibroblasts at different sample concentrations

为明确超分子泛醇的护肤功效及作用机制，采用 0.25% 浓度的超分子泛醇样品处理人原代真皮成纤维细胞，分别收集样品组和空白对照组的细胞裂解液用于总 RNA 抽提。RNA 质量检测结果显示，两组样品 RNA 纯度均达 A 级，琼脂糖凝胶电泳主带清晰，无色素、蛋白质、糖类等杂质污染，且 RNA 总量均大于 1 μ g，满足标准文库

构建的基本要求。测序数据质量控制结果表明，所有样品的 Q30 均大于 85%，测序数据质量可靠。

采用 DESeq2 软件对空白对照组和超分子泛醇样品组的基因表达数据进行差异分析，以 $p < 0.05$ 为筛选标准，共鉴定出 4879 个差异表达基因。图 9 为两组间差异表达基因的聚类热图、火山图和散点图。由图 9 可知，与空白对照组相比，超分子泛醇样品组共有 2510 个基因表达显著下调，2369 个基因表达显著上

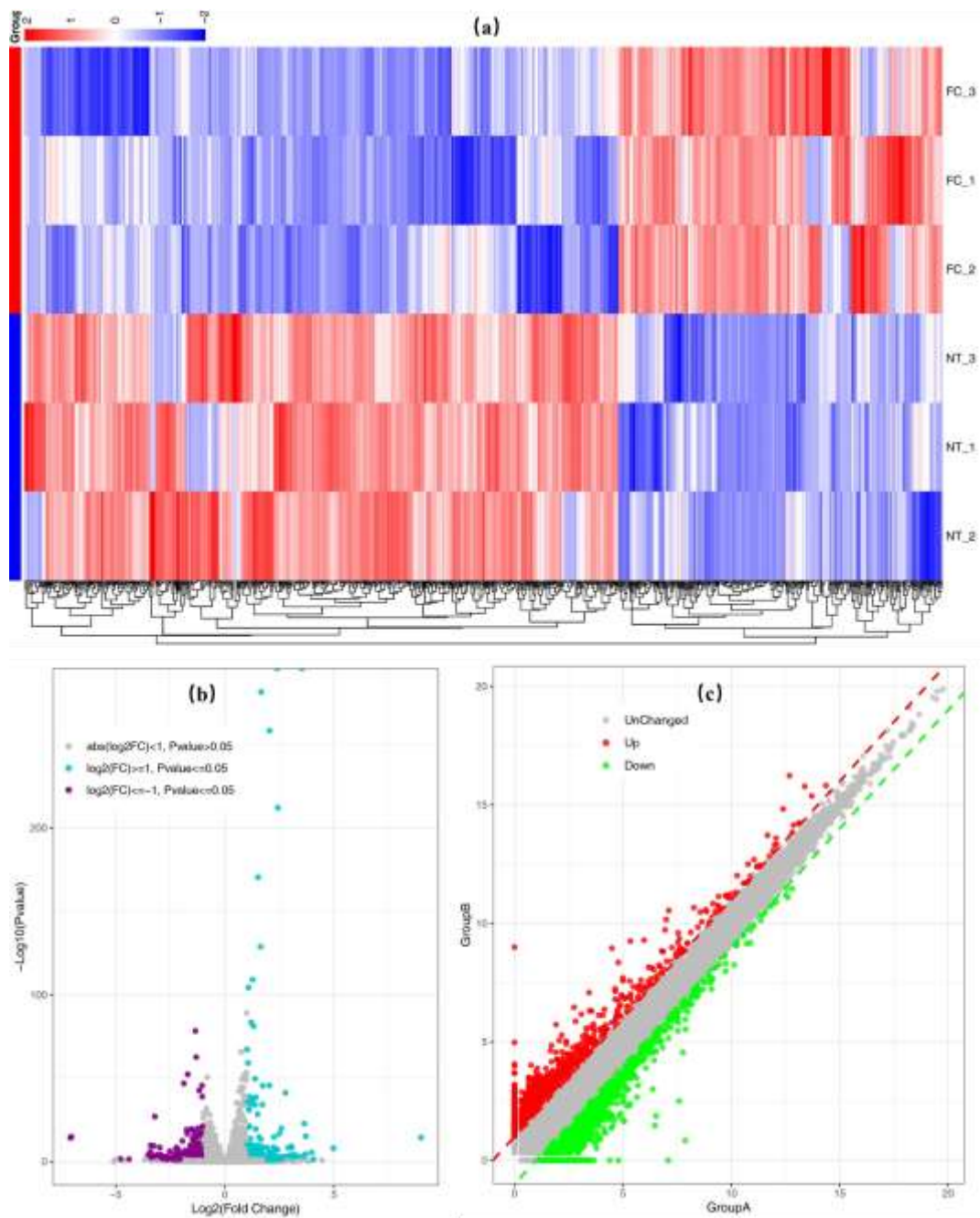


图 9 样品组与空白对照组差异表达基因的聚类热图 (a)、火山图 (b) 及散点图 (c)

Fig. 9 Cluster heatmap (a), volcano plot (b), and scatter plot (c) of differentially expressed genes between the sample group and the blank control group

差异基因功能注释结果显示，超分子泛醇可显著促进多种功能相关基因的表达，

包括 19 个细胞 ATP 能量相关基因，6 个伤口愈合相关基因，6 个胶原蛋白相关基因，2 个细胞自噬相关基因，6 个脂质合成相关基因，2 个生长因子相关基因以及 3 个抗氧化相关基因；同时，对 11 种炎症因子的表达具有不同程度的抑制作用。上述结果提示，超分子泛醇具备皮肤抗皱和抗炎活性。

为进一步阐明超分子泛醇调控细胞功能的分子机制，对差异表达基因进行 GO 功能富集分析及 KEGG 通路富集分析，并按功能类别归类，结果如图 10 和 11 所示。由图 10 可知，超分子泛醇主要影响的生物学过程是细胞器组织，核心作用的细胞组分为细胞内结构，关键调控的分子功能为蛋白质结合。GO 功能富集分析显示，差异表达基因主要定位于细胞内，尤其集中于细胞质、细胞器和细胞轴相关结构。由图 11 可知，KEGG 通路富集分析中最显著的通路有 20 条，说明超分子泛醇主要通过 DNA 损伤修复、信号转导及细胞结构与自噬等关键机制发挥作用，其中非同源末端连接通路、同源重组通路和溶酶体通路的富集程度最为显著。已知同源重组和非同源末端连接是细胞修复 DNA 双链断裂的两个核心通路，而 DNA 损伤修复能力的提升可从根本上实现抗炎和抗皱功效。结合 GO 功能及 KEGG 通路富集分析结果可推断，超分子泛醇可通过基因组调控途径发挥其抗炎及抗皱功效。

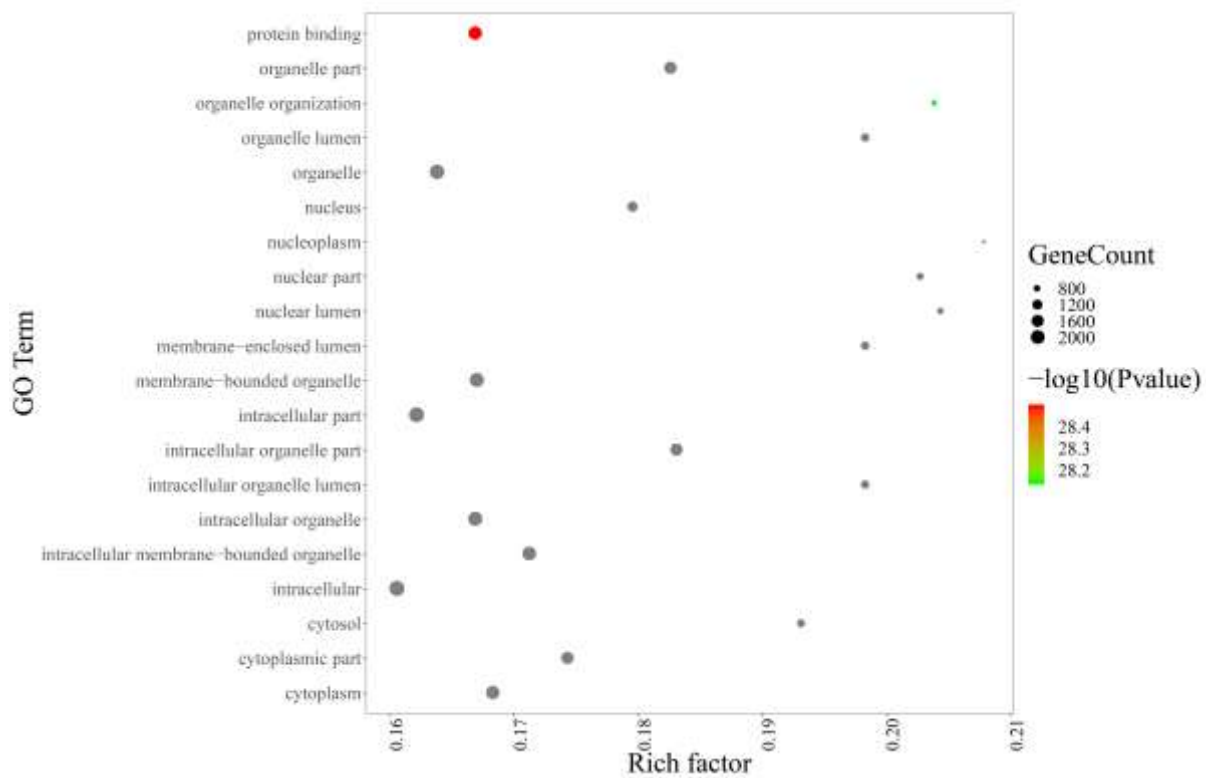
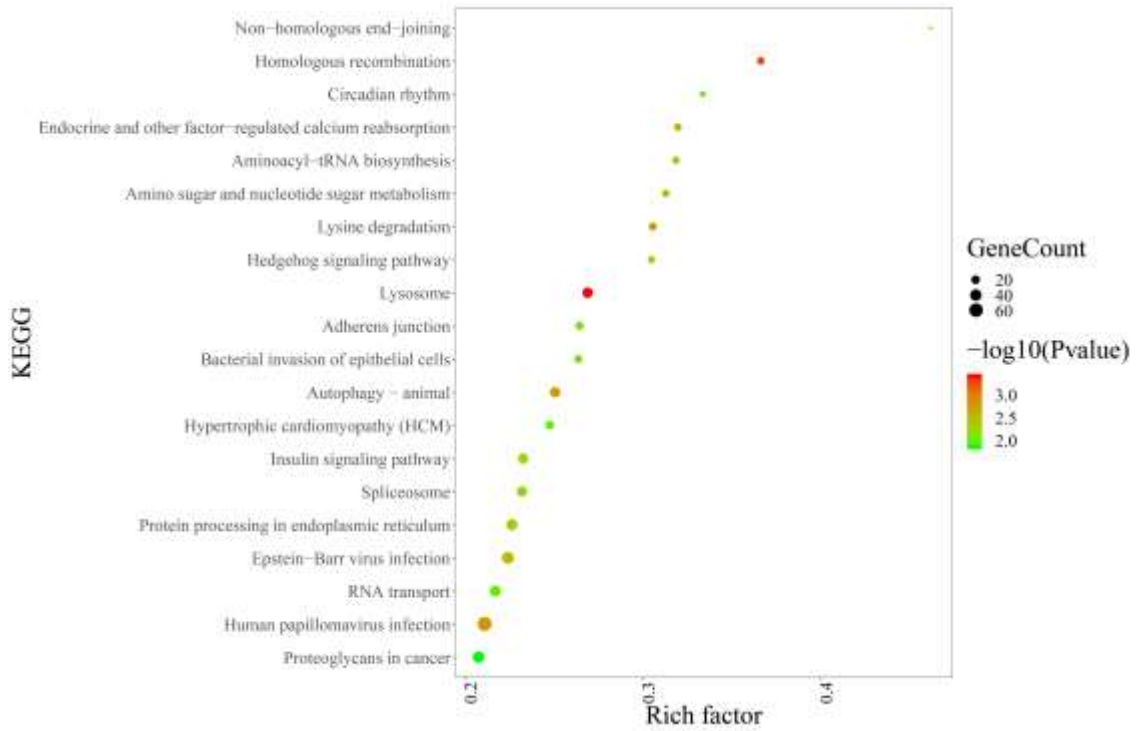


图10 超分子泛醇GO功能富集分析

Fig. 10 GO functional annotation enrichment analysis of supramolecular panthenol



图

11 超分子泛醇KEGG通路富集分析

Fig. 11 KEGG pathway enrichment analysis of supramolecular panthenol

2.5 超分子泛醇精华液的护肤效果评价

按照产品推荐的使用方法开展人体试用试验, 33 名受试者在整个试用周期内均未出现与测试产品相关的皮肤不良反应, 表明该精华液具有良好的皮肤安全性。受试者单次及连续使用测试产品 4 周前后的皮肤相关指标变化情况如图 12 所示。

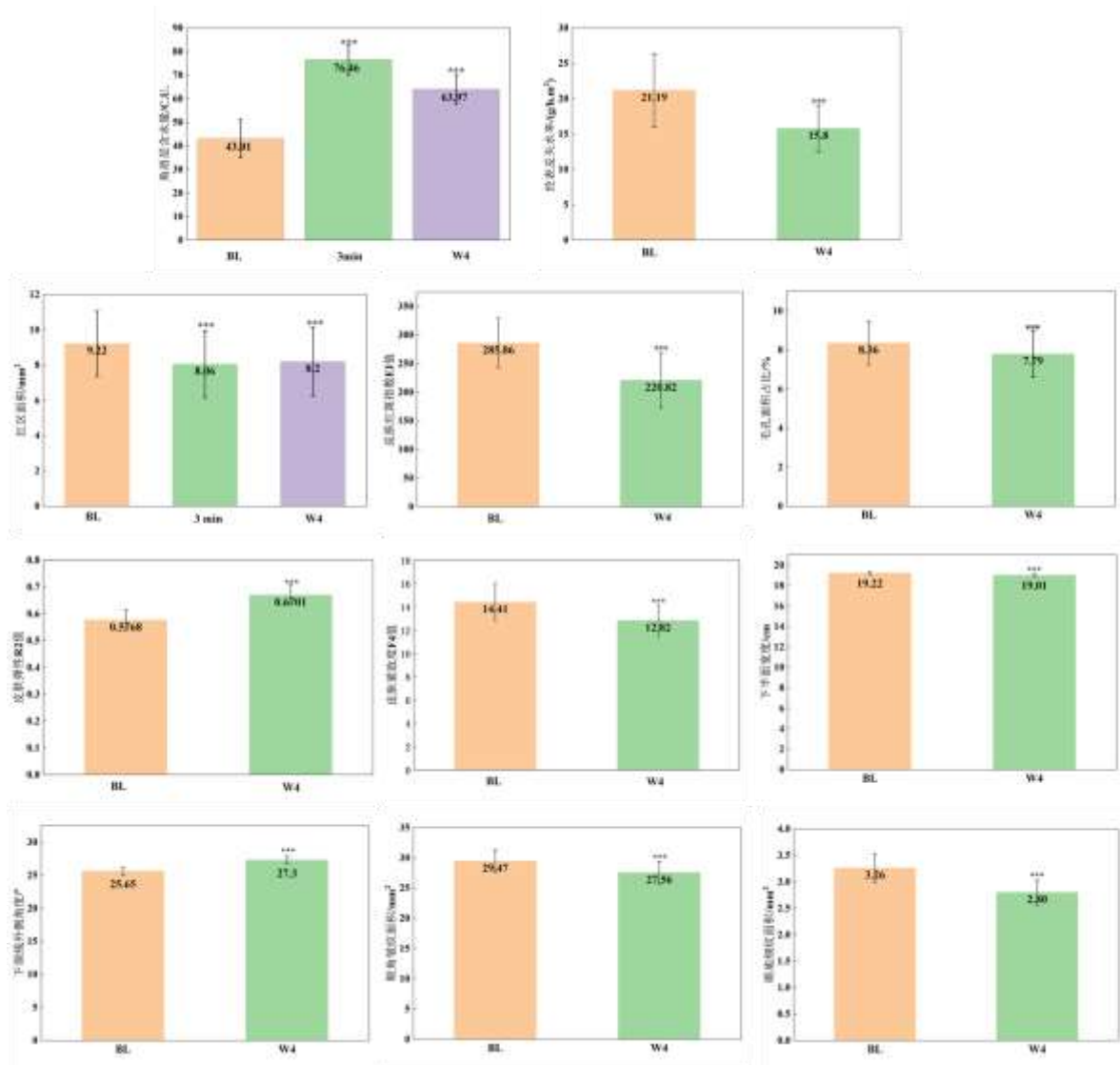


图12 受试者使用超分子泛醇精华液前后皮肤相关指标变化

Fig. 12 Changes in skin-related parameters of subjects before and after the use of supramolecular panthenol essence

由图 12 可知，与使用前（BL）相比，连续使用测试产品 4 周（W4）后，受试者脸颊部位各项皮肤指标均呈现显著改善：角质层水分含量显著提升 48.74%，经表皮失水率（TEWL）显著降低 25.43%，红斑指数（EI 值）显著下降 22.75%；皮肤弹性指标 R2 值升高 16.17%，皮肤紧致度指标 F4 降低 11.74%；此外，红区面积减少 11.06%，

毛孔面积占比降低 6.84%，眼角皱纹面积及眼底细纹面积分别下降 6.50%和 14.14%；下颚线外侧角度扩大 6.43%，下半面宽度缩小 1.05%。上述结果证实，超分子泛醇精华液具备保湿、修护、舒缓、抗皱及紧致功效。

3. 结论

本研究以左旋肉碱为氢键受体、D-泛醇为氢键供体，成功构建了稳定性良好的泛醇-肉碱超分子低共熔体系。光谱与热行为分析结果表明，组分间通过强烈的非共价相互作用形成了具有特征熔融行为的超分子结构，其形成机制经理论计算验证为多重氢键与静电吸引驱动的自发组装过程。超分子改性显著优化了泛醇的流变性能，体系黏度明显降低并呈现典型的剪切稀化行为，结合多维度肤感评价结果，证实超分子化技术能够显著改善泛醇的黏腻肤感。细胞实验结合转录组学分析表明，超分子泛醇在0.25%浓度下对人原代真皮成纤维细胞具有增殖促进作用，可上调胶原合成与细胞能量代谢相关基因的表达，并对炎症因子表现出较为显著的抑制作用。人体功效试验结果显示，连续使用超分子泛醇精华液4周后，受试者皮肤含水量显著提升，经皮水分流失降低，皮肤弹性改善，皱纹面积减少，同时红斑指数与红区面积均显著降低，证实超分子泛醇仍具有显著的护肤功效。

本研究通过超分子策略有效解决了传统泛醇制剂的肤感缺陷，并对超分子泛醇的护肤机制进行了初步探究，为泛醇在化妆品中的高效应用提供了可行的技术方案。后续研究可进一步引入角质形成细胞，从表皮-真皮双维度完善皮肤屏障修护的作用机制论证，还可探究该超分子体系在不同化妆品配方中的应用适配性，为其产业化应用提供更全面的实验数据支撑。

参考文献

- [1] PROKSCH E, BONY R, TRAPP S, et al. Topical use of dexpanthenol: a 70th anniversary article [J]. Journal of Dermatological Treatment, 2017, 28(8): 766-773.
- [2] EBNER F, HELLER A, Rippke F, et al. Topical Use of Dexpanthenol in Skin Disorders [J].

American Journal of Clinical Dermatology, 2002, 3(6): 427-433.

- [3] WOLLENBERG A. Basic Emollients for the Management of Xerosis Cutis : Biophysical Properties, Clinical Evidence, and Practical Considerations[J]. International Journal of Dermatology, 2025, 64: 3-4.
- [4] 钱进, 邓慧, 李华真, 等. 化妆品中保湿剂的拮抗与增效作用探究[J]. 广东化工, 2022,49(19):49-54.
- QIAN J, DEGN H, LI H Z, et al. Research on Antagonistic and Synergistic Effects of Moisturizers in Cosmetics [J], Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(19): 49-54.
- [5] PETROVI J D, CAREVIC M T A, GLAMOCLIIJA J M, et al. Mixture Containing 5% Polysaccharide Extract of *Cerioporus squamosus* (Huds.) Quélet, 5% Dexpanthenol, and 0.2% Hyaluronic Acid Shows In Vitro and In Vivo Wound Healing Properties [J]. Pharmaceuticals, 2025: 18(3): 416.
- [6] 朱佳. 含 β -葡聚糖和泛醇的喷雾剂对小鼠AEW模型修复皮肤屏障、缓解炎症及瘙痒的作用[D]. 北京: 北京协和医学院, 2022.
- ZHU J. Effects of sprays containing-glucan and panthenol on repairing skin barrier, alleviating inflammation and pruritus in an AEW-induced mouse model [D]. Beijing: Peking Union Medical College Hospital, 2022.
- [7] HUTH S, MARQUARDT Y, HUTH L, et al. Molecular insights into the effects of laser-induced optical breakdown (LIOB) after 1064 nm picosecond laser irradiation using a novel melanocyte-containing 3D skin model[J]. Lasers in Medical Science, 2025, 40(1): 223.
- [8] TAN C, PENG K, LIM T, et al. The combination of allantoin, bisabolol, D-panthenol and dipotassium glycyrrhizinate mitigates UVB-induced PGE₂ synthesis by keratinocytes [J]. International Journal of Cosmetic Science, 2024, 46(5): 691-701.
- [9] PAVLACKOVA J, EGNER P, SEDLACEK T, et al. In vivo efficacy and properties of semisolid formulations containing panthenol [J]. Journal of Cosmetic Dermatology, 2019, 18(1):346-354.

- [10] 蔡雅琴. “丹皮酚—薄荷脑”低共熔物纳米乳凝胶的制备与评价[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2017.
- CAI Y Q. Preparation and evaluation of nanoemulsion-loaded gel based on paeonol-menthol eutectic mixture [D]. Yin Chuan: Ningxia Medical University, 2017.
- [11] BAI D, WANG Z, XIAO Y, et al. Transdermal delivery of elastin peptide assisted by betaine-based deep eutectic solvent to ameliorate skin photoaging [J]. *Biomaterials Advances*, 2024, 163: 213965.
- [12] CZYRSKI G S, FRESE H M K, RADES T, et al. Comparing effects of terpene-based deep eutectic solvent and solid microneedles on skin permeation of drugs with varying lipophilicity [J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2024, 205: 114576.
- [13] KAPRE S, PALAKURTHI S S, JAIN A, et al. DES-igning the future of drug delivery: A journey from fundamentals to drug delivery applications[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 400: 124517.
- [14] 李明键, 赵志远, 郑璐遥, 等. ILs/DES在经皮药物递送中的应用研究进展[J]. *中国医药工业杂志*, 2022, 53(4): 454-463.
- LI M J, ZHANG Z Y, ZHENG L Y, et al. Research Progress in Application of ILs/DES in Transdermal Drug Delivery [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutics* 2022, 53(4): 454-463.
- [15] 周湖武, 唐莉凤, 周紫燕, 等. 一种超分子酸酶组合物的开发及其去角质功效评价[J]. *香料香精化妆品*, 2025, 5: 72-77.
- ZHOU H W, TANG L F, ZHOU Z Y, et al. Development of a Supramolecular Acid-Enzyme Composition and Evaluation of Its Exfoliation Efficacy [J]. *Flavour Fragrance Cosmetic*. 2025, 5: 72-77.
- [16] NAVAOCAMPO M F, ALFUHAID L, SANTANA A, et al. Structural properties and stability of the Betaine-Urea natural deep eutectic solvent[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 343: 117655.
- [17] 文静, 牛俊淞, 吴玉珍, 等. 冰片-薄荷脑低共熔物载川芎嗪纳米乳凝胶制备[J]. *中成药*, 2025, 47(8): 2522-2529.
- WEN J, NIU J S, WU Y Z, et al. Preparation of borneol-menthol eutectic mixture-loaded nanoemulsion gel of tetramethylpyrazine [J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*.

2025,47(8):2522-2529.

- [18] HUBER V, HIOE J, TOURAUD D, KUNZ W. Uncovering the curcumin solubilization ability of selected natural deep eutectic solvents based on quaternary ammonium compounds [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 361: 119661.
- [19] WANG D Y, ZHANG M, LAW C L, et al. Natural deep eutectic solvents for the extraction of lentinan from shiitake mushroom: COSMO-RS screening and ANN-GA optimizing conditions [J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 136990.
- [20] HOU Y C, ZHANG B Z, GAO M J, et al. Densities, viscosities and specific heat capacities of deep eutectic solvents composed of ethanediol+betaine and ethanediol+L-carnitine for absorbing SO₂ [J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2023, 179, 106999.
- [21] MEHRABI F, GHAEDI M, DIL E A. DL-carnitine-based green hydrophobic deep eutectic solvent for the enrichment of bisphenol A in mineral water based on ultrasound-assisted liquid-phase microextraction [J]. *Talanta*, 2024, 266, 125045.
- [22] 叶玉玺,丁晓茜,池华睿,等.疏水性低共熔溶剂氢键交互作用调控及萃取铜性能[J].*化工进展*,2022,41(S1):397-406.
- YE Y X, DING X X, CHI H R, et al. Hydrophobic deep eutectic solvent hydrogen bond interaction regulation and extraction performance of copper [J].*Chemical Industry and Engineering Progress*,2022,41(S1):397-406.
- [23] NASEEM Z, SHEHZAD R A, IHSAN A, et al. Theoretical investigation of supramolecular hydrogen-bonded choline chloride-based deep eutectic solvents using density functional theory[J]. *Chemical Physics Letters*, 2021,769:138427.