

枯草芽孢杆菌酶在化妆品中的去角质功效与安全评估

林琳^{1,*}, 王珍珍², 徐思伟¹, 陈丽¹, 王蕊蕊¹

(1. 上海科黛生物科技有限公司, 上海 201703; 2. 南京玻得理生物科技有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要: 研究目的: 旨在探究枯草芽孢杆菌酶(*Bacillus subtilis* enzyme)在皮肤护理中的应用潜力。以大豆豆粕为培养基制备枯草芽孢杆菌酶, 得到酶活约为 3.9 万 U/g, 分子量分布主要集中在两个峰值 Mw=2122 和 12833。并且测定了 2% 枯草芽孢杆菌酶稀释液在临床测试中对皮肤的影响, 测试指标包括 TEWL、皮肤血红蛋白、红区面积、红区 a* 值, 光泽度、皮肤亮度 L*/b*/ITA° 值、粗糙度 SEr 和平滑度 SEsm 值以及面部鳞屑指数 DI 值。即时测试效果(15min)和长效测试效果(3 天、14 天和 28 天)结果均表明该稀释液具有显著降低 TEWL、皮肤血红蛋白、红区面积、皮肤粗糙度和鳞屑指数, 并且显著提升光泽度, 皮肤亮度和平滑度 (P<0.05)。枯草芽孢杆菌酶具有潜在的修护舒缓、平滑肌肤和去角质的功效, 可进一步应用于面部护理品中。

关键词: 枯草芽孢杆菌酶; 分子量; 皮肤血红蛋白; 粗糙度; 光泽度; 去角质

中图分类号: TQ658 **文献标识码:** A **文章编号:** CCSJ-3007-9683-20250002

Exfoliating efficacy and safety assessment of sutilains in cosmetics

LIN Lin^{1,*}, WANG Zhenzhen², XU Siwei¹, CHEN Li¹, WANG Ruirui¹

(1. Shanghai Corday Biotechnology Co., Ltd., Shanghai 201703, China;
2. Nanjing Baudry Biotechnology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: Research objective: To investigate the activity of (*Bacillus subtilis* enzyme)Potential application in skin care .Sutilains was prepared using soybean meal as the culture medium, yielding an enzyme activity of approximately 39,000 U/g. The molecular weight distribution was mainly concentrated in two peaks with Mw = 2122 and 12833. Additionally, the effects of a 2% sutilains dilution on the skin were evaluated in clinical tests. The test indicators included TEWL (transepidermal water loss), skin hemoglobin, erythema area, erythema a* value, gloss, skin brightness (L*/b*/ITA° values), roughness (SEr), smoothness (SEsm), and facial scaling index (DI). Both immediate test results (15 minutes) and long-term test results (3

收稿日期: 2025-05-22; 定用日期: 2025-06-23。

作者简介: 林琳 (1981—), 女, 学士, E-mail: lin.lin@corday.tech。

days, 14 days, and 28 days) demonstrated that the dilution significantly reduced TEWL, skin hemoglobin, erythema area, skin roughness, and scaling index, while significantly improving gloss, skin brightness, and smoothness ($P<0.05$). Sutilains has the potential to repair and soothe the skin, smooth the skin, and remove dead skin cells, and can be further applied in facial care products.

Key words: Sutilains; molecular weight; skin hemoglobin; roughness; gloss; exfoliation

引言

蛋白酶是一类能够水解蛋白质的酶，通过切断角质细胞中蛋白质的肽键，使角质细胞之间的连接松散，从而促进老化角质层的脱落。与物理磨砂或化学剥脱剂相比，蛋白酶去角质相对温和，不会对皮肤造成过度刺激或损伤^[1]。其中，菠萝蛋白酶是一种从菠萝中提取的蛋白酶，具有广泛的底物特异性，能够分解角蛋白蛋白键，有效去除皮肤表层的死皮细胞，改善皮肤的光滑度和外观。菠萝蛋白酶具有抗炎和抗菌特性，适合用于痤疮易发的皮肤，有助于减少炎症和促进伤口愈合，但是对于菠萝过敏的人群，可能会引起皮肤过敏反应^[2]。木瓜蛋白酶是从木瓜中提取的蛋白酶，对角蛋白的分解能力较强，能有效去除皮肤表层的死皮细胞，改善皮肤的光滑度和色泽^[1]。木瓜蛋白酶的去角质效果较强，适合用于深层清洁和改善皮肤粗糙。通过分解角蛋白，减少黑色素沉积，有助于改善肤色不均。由于其去角质效果较强，可能会对敏感皮肤造成刺激，特别是对木瓜过敏的人群可能会出现过敏反应。枯草芽孢杆菌酶是一种由枯草芽孢杆菌产生的蛋白酶，具有温和的去角质效果。虽然其去角质效果可能不如菠萝蛋白酶和木瓜蛋白酶强，但对敏感皮肤更为友好，不易引起刺激，并且除了去角质外，还具有一定的修护和舒缓功能。对于严重角质堆积的皮肤，效果可能不如菠萝蛋白酶或木瓜蛋白酶显著，然而酶的功效与其活力紧密相关^[3]。该研究采用枯草芽孢杆菌发酵得到蛋白酶，添加到化妆品配方中测定其去角质的临床功效，结果表明枯草芽孢杆菌酶在皮肤角质护理领域具有潜在的应用价值。

1 实验部分

1.1 主要材料、试剂和仪器

枯草芽孢杆菌，菌种保藏号 CGMCC No.13932，南京工业大学；去离子水，自制；大豆豆粕，山东玉宝生物科技股份有限公司；Folin-Ciocalteu 试剂，美国 Sigma-Aldrich。

PL aquagel-OH MIXED-M 色谱柱，安捷伦科技（中国）有限公司；高效液相色谱系统 Waters E2695，美国 Waters Corporation；微米滤膜，德国 MilliporeSigma；聚乙二醇（PEG）标准品，美国安捷伦科技；面部图像分析仪，VISIA-CR 7，美国 Canfield；皮肤油脂测试探头，Sebumeter SM815、水分流失测试探头，Tewameter TM HEX、黑色素和血红素测试探头，Mexameter MX18、皮肤表面纹理测试仪，Visioscan VC20plus，德国 Courage+khazaka。

1.2 实验方法

1.2.1 制备方法

以大豆豆粕为培养基，加入枯草芽孢杆菌进行发酵，调节体系温度 37℃、pH=7.2、溶氧量 25 %、接种量 3.5 % 和发酵时间 48 h。发酵完成后，提取枯草芽孢杆菌酶，卧式离心分离去除菌体，离心速度为 4,000 rpm。弃渣并收集上清液，使用管式高速离心得到离心液，高速离心速度为 25,000 rpm。然后通过微滤、超滤两步关键步骤除菌和杂质得到几乎无菌的枯草芽孢杆菌滤液，最后喷干得到粉剂产品方便长期室温储存。

1.2.2 蛋白酶酶活的测定

参考 GB/T 23527.1-2023《酶制剂质量要求

第1部分:蛋白酶制剂》中福林法(Folin-Ciocalteu法)进行酶活测定^[4],其原理是通过测定蛋白酶水解酪蛋白产生的酪氨酸含量来计算酶活(U/g) $=C \times V \times F / (t \times m)$,其中C为酪氨酸浓度($\mu g/mL$),V为反应液体积(mL),F为稀释倍数,t为反应时间(min),m为样品质量(g)。

1.2.3 GPC 测定表观分子量

取3~5 mg样品溶解于1 mL的去离子水中,溶解后静置1小时,使用0.22微米滤膜(聚四氟乙烯或者尼龙滤膜)过滤后进行测试。在40℃的水溶液中,使用流速为1.0 mL/min的Waters-E2695凝胶渗透色谱(GPC)系统,配备折光指数检测器,对样品进行了GPC测试。通过使用线性聚乙二醇(PEG,测量区间为 $M_n = 300-50W$)作为标样,在单根PL Aquagel-OH MIXED-M色谱柱上测定了样品的表观分子量。

1.2.4 临床测试

测试人群:入选标准包括:(1)18-55岁中国健康男女,(试验开始时刻);(2)面部有轻度痤疮皮损(至少1个炎性丘疹,至少10个粉刺);(3)敏感肌肤(乳酸刺痛反应阳性);(4)Sebumeter筛选额头隔夜油脂含量 $\geq 90 \mu g/cm^2$;(5)毛孔粗大,毛孔评分 ≥ 2 分(《皮肤老化图谱(亚洲人)》P61);(6)无过敏性疾病,无化妆品或其他外用制剂过敏史;(7)既往无光感性疾病史,近期内未使用影响光感性的药物;(8)受试部位的皮肤应无色素沉着、炎症、瘢痕、色素痣、多毛等现象^[5]。

排除标准包括:(1)妊娠或哺乳期妇女,或近期有备孕计划者;(2)有银屑病、湿疹、异位性皮炎、严重痤疮等皮肤病史者;或患有其他慢性系统性疾病者;(3)近1个月内口服或外用过皮质类固醇激素等抗炎药物者;(4)胰岛素依赖糖尿病患者;(5)其他影响本次试验的要求;(6)近1个月内参加过其他临床试验者。

测试筛选人数40人,入组人数32人,有效分析人数为31人,测试年龄为21~46岁,平均年龄为 31.32 ± 7.85 岁。

志愿者要求:样品为含2%枯草芽孢杆菌酶的水溶液,人体临床测试项目包括该样品刺激性测试和去角质功效的相关测试:(1)温和(无

刺激)功效:医生临床评估不良反应发生数。

(2)修护功效:使用Tewameter测试受试者两侧面部皮肤经表皮水分流失率(Transepidermal Water Loss, TEWL)。(3)舒缓功效:使用Mexameter测试受试者样品侧面部皮肤血红素含量,并用VISIA-CR拍摄照片后,使用IPP分析面部样品侧红区图下红区面积占比和标准光源下 a^* 值参数值^[6]。(3)提升光泽度效果:使用Glossymeter测试受试者样品侧面部光泽度^[7]。(4)提亮效果:VISIA-CR拍摄照片后,使用IPP分析标准光源下样品侧面部皮肤亮度 L^* 值,并同步输出皮肤红度 a^* 值、皮肤黄度 b^* 值、个体类型角 ITA° 值^[8]。(5)改善粗糙度效果:使用VC 20测试受试者面部皮肤粗糙度SEr值^[9]。(6)平滑肌肤效果:使用VC 20测试受试者面部皮肤平滑度SEsm值^[10]。(7)去角质功效:使用VC 20测试受试者面部鳞屑指数DI值^[11]。

测试方法:T0(第0天):(1)按照要求招募受试者,测试人员讲解测试流程,受试者签署知情同意书。(2)按照要求进行筛选,合格受试者清洁测试部位后在温度: $21.0^\circ C \pm 1.0^\circ C$ 和湿度: $50\% \pm 10\% RH$ 的恒温恒湿室平衡30 min。(3)受试者进行仪器测试、临床评估及自评问卷。(4)测试结束后,测试人员发放测试样品和使用日记,介绍样品使用方法和注意事项。测试人员按照附件随机表指导受试者当场使用一次样品。

短效测试T15 min:受试者进行仪器测试及自评问卷。长效测试D3、D14和D28受试者来访,清洁测试部位后在恒温恒湿室平衡30 min。受试者进行仪器测试、临床评估及自评问卷,测试流程结束。

统计学方法:使用EXCEL软件对各测试时点测量值进行描述性统计,包括均值、标准误差等。使用SPSS软件,先用Shapiro-Wilk Test方法进行数据改变值正态分布检验,若数据呈正态分布,则采用配对样本t检验,否则采用两个相关样本Wilcoxon秩和检验。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。使用前后的比较,采用两个相关样本Wilcoxon秩和检验,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。统计有益项(4分+5分)选项的比例,并进行二项分布检验。检验比例0.6,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

计算改变率 $\% = (\text{使用后均值} - \text{使用前均值}) / \text{使用前均值} \times 100\%$ 。在图例中, $P \geq 0.05$, $P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 分别用 “n.s.”, “*”, “**” 和 “***” 表示。

2 结果与讨论

2.1 酶活测定和分子量分布

该酶活力单位定义表示在 $\text{pH}=7.0$ 、 37°C 条件下, 1 分钟内水解酪蛋白产生 $1 \mu\text{g}$ 酪氨酸所需的酶量为 1 个酶活单位 (U)。使用分光光度计在 660 nm 波长处测定各管的吸光度。以空白管的吸光度为对照, 计算样品管的净吸光度。根据计算公式测定该样品酶活为 39574.58 U/g 。

GPC 测试结果表明, 该枯草芽孢杆菌酶的分子量分布分为前峰和后峰 (图 1), 前峰峰值在 $M_w=2122$ 左右, 后峰峰值约 $M_w=12833$ 。这可能意味着该样品酶中存在不同大小的蛋白质或者多肽链分子。

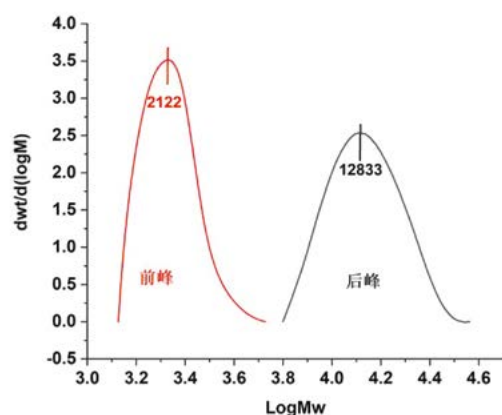


图 1 GPC 分子量分布图
Fig.1 GPC Molecular Weight Distribution Curve

2.2 临床试验结果

2.2.1 样品的温和性

采用《化妆品安全技术规范 2015 版》中“人体试用试验皮肤反应分级标准”, 皮肤反应分为五个等级, 0= 无反应, 1= 微弱红斑, 2= 红斑、浸润、丘疹, 3= 红斑、水肿、丘疹、水疱,

4= 红斑、水肿、大疱。结果显示, 在 28 天测试中, 受试者全部未出现不良反应 (临床评估), 且 100% 的受试者认同样品温和 (无刺激) 或者 100% 的受试者认同使用样品过程中无不适反应。

2.2.2 修护效果

如图 2 所示, 与使用前相比, 连续使用样品 15min、D3、D14 和 28 天后, 皮肤经表皮水分流失率均显著性降低 ($P < 0.001$), 分别降低了 29.34%, 24.43%, 28.75% 和 41.10%, 表明测试样品具有即时和长效修护的功效。

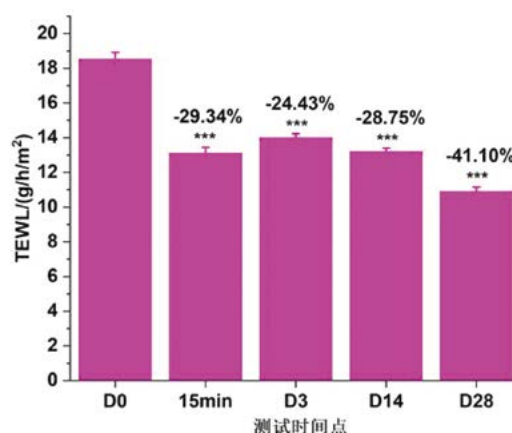


图 2 皮肤经表皮水分流失率变化图
Fig.2 Changes in Transepidermal Water Loss (TEWL) of the Skin

2.2.3 舒缓效果

如图 3 所示, 参数值越小, 皮肤血红素含量越低。红区面积占比、 a^* 值越小, 皮肤越不红。单次使用样品 15min, 与使用前相比, 皮肤血红素含量显著性降低了 14.06% ($P < 0.001$), 红区面积占比显著性降低了 4.41% ($P < 0.01$), 皮肤红度 a^* 值显著性降低了 8.73% ($P < 0.001$), 表明测试样品具有 15min 舒缓的即时功效。与使用前相比, 连续使用样品数日后, 在 D3、D14 和 D28, 皮肤血红素含量显著性分别降低了 7.51%、13.45% 和 25.66% ($P < 0.001$), 红区面积占比显著性分别降低了 1.12%、2.70% 和 3.18% ($P < 0.05$), 皮肤红度 a^* 值显著性分别降低了 4.17% ($P < 0.01$) 7.00% 和 9.52% ($P < 0.001$); 表明测试样品具有长效舒缓的功效。

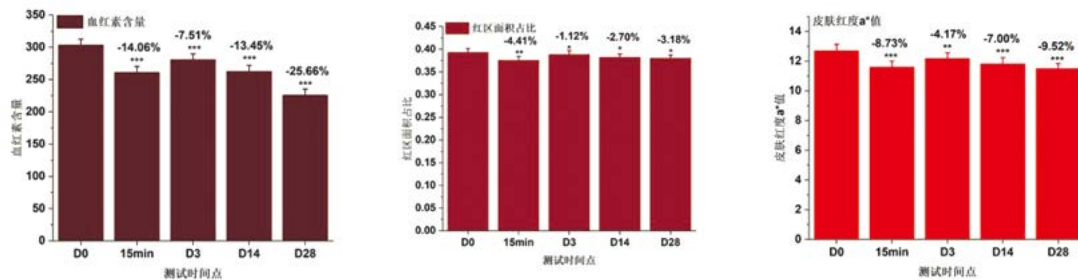


图 3 Mexameter 血红蛋白含量变化图 (左)、VISIA-CR 红区面积占比变化图 (中) 和 VISIA-CR 皮肤红度 a* 值变化图 (右)

Fig.3 Variations of hemoglobin content measured by Mexameter (left), red area percentage measured by VISIA-CR (middle), skin redness a* value measured by VISIA-CR (right).

2.2.4 光泽度变化和提亮效果

如图 4 所示, 参数值越大, 光泽度越高。单次使用样品后 15min, 与使用前相比, 皮肤光泽度显著性提高了 25.84% ($P<0.001$), 表明测试样品具有 15min 提升光泽度的效果。与使用前相比, 连续使用样品 D3、D14 和 D28 天后, 皮肤光泽度显著性分别提升了 14.13%、22.64% 和 35.87% ($P<0.001$), 表明测试样品具有长效提升光泽度的效果。皮肤提亮效果由皮肤亮度 L^* 值、皮肤黄度 b^* 值和个体类型角 ITA° 值三个参数表示, 当 L^* 值越大, 皮肤颜色越亮; b^* 值越小, 皮肤颜色越不黄; ITA° 值越大, 皮肤颜色越浅。单次使用样品后 15min, 与使用前相比, 皮肤亮度 L^* 值显著性提高了 0.62% ($P<0.05$), 皮肤黄度 b^* 值显著性降低了 0.87% ($P<0.01$), 个体类型角 ITA° 值显著性提高了 1.73% ($P<0.01$), 表明测试样品具有 15min 提亮的效果。与使用前相比, 连续使用样品 D3、D14 和 D28 天后, 皮肤亮度 L^* 值显著性分别提升了 0.79% ($P<0.01$) 0.86% ($P<0.05$) 和 1.18% ($P<0.01$), 皮肤黄度 b^* 值显著性分别降低了 1.64%、2.33% 和 4.24% ($P<0.01$), 个体类型角 ITA° 值显著性分别提升了 2.50%、2.98% 和 4.91% ($P<0.001$), 表明测试样品具有长效提亮的效果。

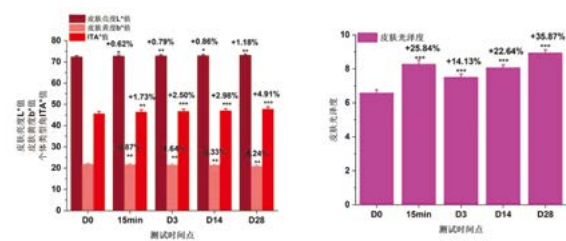


图 4 皮肤光泽度变化图 (左) 和皮肤提亮效果图 (右)
Fig.4 Variations of skin luster (left) and the brightening effect (right).

2.2.5 皮肤粗糙度 SEr 值和平滑度 SEsm 值

如图 5 所示, 皮肤粗糙度 SEr 参数值越小表示皮肤越不粗糙。单次使用样品后 15min, 与使用前相比, 皮肤粗糙度 SEr 值显著性降低了 8.19% ($P<0.001$), 表明测试样品具有 15min 改善粗糙度的效果。与使用前相比, 长效使用样品 D3、D14 和 D28 天后, 皮肤粗糙度 SEr 值显著性分别降低了 12.53%、26.27% 和 39.76% ($P<0.001$), 表明测试样品具有长效改善粗糙度的效果。平滑度 SEsm 参数值越小表示皮肤越平滑。单次使用样品后 15min, 与使用前相比, 皮肤平滑度 SEsm 值显著性降低了 6.81% ($P<0.001$), 表明测试样品具有 15min 平滑肌肤的效果。与使用前相比, 连续使用样品 D3、D15 和 D28 天后, 皮肤平滑度 SEsm 值显著性分别降低了 12.55%、18.39% 和 30.25% ($P<0.001$), 表明测试样品具有长效平滑肌肤的效果。

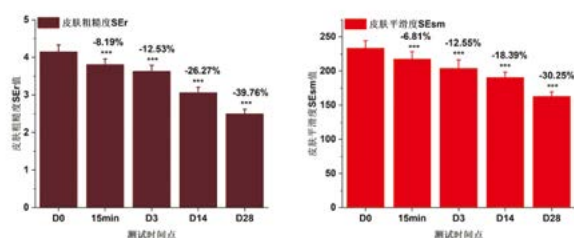


图5 皮肤粗糙度SEr值(左)和平滑度SEsm值(右)变化图

Fig.5 Variations of skin roughness SEr value (left) and skin smoothness SEsm value (right).

2.2.6 鳞屑指数DI值

如图6所示,DI参数值越小,皮肤鳞屑越少。单次使用样品后15min,与使用前相比,鳞屑指数DI值显著性降低了8.62%($P<0.001$),表明测试样品具有15min去角质的功效。与使用前相比,连续使用样品D3、D14和D28天后,皮肤鳞屑指数DI值显著性分别降低了4.32%、14.60%和18.76%($P<0.001$),表明测试样品具有长效去角质的功效。根据VC20实拍图显示

(图7),橘红色和橘黄色代表鳞屑较多,蓝色代表鳞屑较少,使用样品15min后,鳞屑数量有较好的鳞屑减少即时效果,随着使用时间增加,从D3到D28天,鳞屑指数随着时间而有下降趋势,这与图6中的量化数据趋势是对应的。

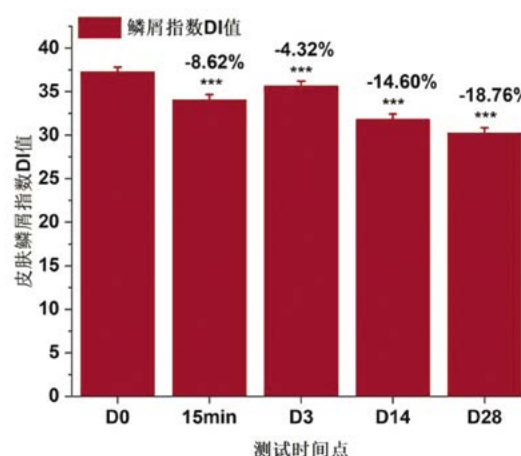


图6 皮肤鳞屑指数DI值变化图
Fig.6 Variation of the skin flaking index DI value

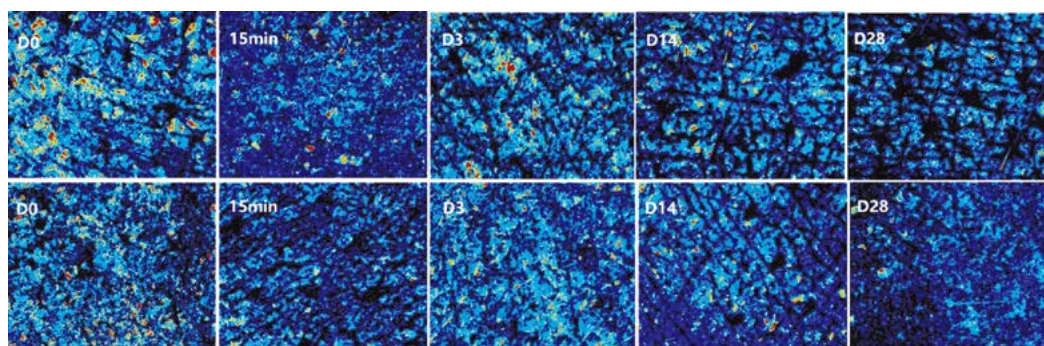


图7 皮肤鳞屑VC20实拍图(上:女,22岁;下:女,21岁)
Fig.7 Real photographs of skin flaking (VC20) (Top: Female, 22 years old; Bottom: Female, 21 years old)

2.2.7 消费者自评

本次试验,通过31名受试者单次使用测试样品2%枯草芽孢杆菌酶调理液后15分钟,由自评问卷统计结果可知(表1):(1)100.0%的受试者认同使用后,感觉样品温和不刺激。(2)83.9%受试者认为面部肌肤泛红得到15min的即时显著性改善($P<0.01$),D3、D14和D28改善率分别为96.8%、93.5%和96.8%,均具有显

著性($P<0.001$)。(3)≥93.5%的受试者认同使用后,认同皮肤不紧绷。(4)≥90.3%的受试者认同使用后,认同皮肤更细腻并且肤色更均匀;(5)96.8%的受试者认同使用后,认同皮肤油腻得到改善;(6)≥93.5%的受试者认同使用后,感觉有助于调节皮肤水油平衡;(7)100%受试者使用样品后,感觉刺激被舒缓,并且适用于敏感肌肤;(8)≥96.8%受试者感觉到肌肤状态更稳定;

(9) ≥93.5% 受试者感觉使用样品后皮肤有光泽。

表 1 使用样品后受试者自评问卷统计结果
Table 1 Statistical results of participants self-evaluation
questionnaire after using the sample

问题	认同度百分比/%和显著性							
	15min	显著性	D3	显著性	D14	显著性	D28	显著性
使用后, 感觉样品温和不刺激	100	***	100	***	100	***	100	***
使用后, 面部肌肤泛红得到改善	83.9	**	96.8	***	93.5	***	96.8	***
使用后, 感觉皮肤不紧绷	93.5	**	93.5	***	100	***	100	***
使用后, 感觉肤质更细腻	93.5	***	90.3	***	96.8	***	96.8	***
使用后, 感觉肤色更均匀	93.5	***	90.3	***	93.5	***	96.8	***
使用后, 感觉皮肤油腻得到改善	96.8	***	96.8	***	96.8	***	96.8	***
使用后, 感觉有助于调节皮肤水油平衡	100	***	93.5	***	93.5	***	93.5	***
使用后, 感觉刺激被舒缓	100	***	100	***	100	***	100	***
使用后, 感觉肌肤状态更稳定	100	***	96.8	***	96.8	***	96.8	***
使用后, 感觉皮肤有光泽	96.8	***	93.5	***	93.5	***	93.5	***
使用后, 感觉适用敏感肌肤	100	***	100	***	100	***	100	***

3 结论

本研究通过枯草芽孢杆菌发酵法制备了枯草芽孢杆菌酶, 根据福林酚法测定酶活约为 3.9 万 U/g。GPC 测定结果表明分子量分布出现前峰和后峰, 峰值分别为 $M_w=2122$ 和 12833, 表明多肽链和蛋白结构均可能存在发酵产物中, 也有可能是蛋白酶的降解形成的多肽链。测定 2% 枯草芽孢杆菌酶调理液对人体皮肤温和无刺激性, 进行后续的系列的临床测试, 包括即时功效 (15min) 和长效功效 (D3、D14 和 D28 天), 测定指标包括 TEWL、皮肤血红素、红区面积、红区 a^* 值, 光泽度、皮肤亮度 $L^*/b^*/ITA^\circ$ 值、粗糙度 SEr 和平滑度 SEsm 值以及面部鳞屑指数 DI 值测定该 2% 样品稀释液是否具有去角质效果。在 15min 即时效果测试中, TEWL 的改变值显著性降低, 表明测试样品具有 15min 修护的功效。单次使用样品 15min, 与使用前相比, 皮肤血红素含量显著性降低了 14.06%, 红区面积占比显著性降低了 4.41%, 皮肤红度 a^* 值显著性

降低了 8.73%; 表明测试样品具有 15min 舒缓的功效。与使用前相比, 皮肤光泽度显著性提高了 25.84%, 表明测试样品具有 15min 提升光泽度的效果。皮肤黄度 L^* 值显著性提高了 0.62%, 皮肤黄度 b^* 值显著性降低了 0.87%, 个体类型角 ITA° 值显著性提高了 1.73%, 表明测试样品具有 15min 提亮的效果。与使用前相比, 皮肤粗糙度 SEr 值显著性降低了 8.19%, 表明测试样品具有 15min 改善粗糙度的效果; 皮肤平滑度 SEsm 值显著性降低了 6.81%, 表明测试样品具有 15min 平滑肌肤的效果。并且, 与使用前相比, 鳞屑指数 DI 值显著性降低了 8.62%, 表明测试样品具有 15min 即时去角质的功效。

在长效测试中, 连续使用样品 D3、D14 和 D28 天后, 皮肤经表皮水分流失率显著降低了 24.43%、28.75% 和 41.10%, 表明测试样品具有长效 (D3-D28) 的修护功效。皮肤血红素含量显著性分别降低了 7.51%、13.45% 和 25.66%, 红区面积占比显著性降低了 1.12%、2.70% 和 3.18%, 皮肤红度 a^* 值显著性降低了 4.17%、7.00% 和 9.52%, 表明具有长效舒缓的功效。皮肤光泽度显著提升了 14.13%、22.64% 和 35.87%, 表明测试样品具有长效提升光泽度的效果。皮肤亮度 L^* 值显著性提升了 0.79%、0.86% 和 1.18%, 皮肤黄度 b^* 值显著性降低了 1.64%、2.33% 和 4.24%, 个体类型角 ITA° 值显著性提升了 2.50%、2.98% 和 4.91%, 表明样品具有长效提亮的效果。皮肤粗糙度 SEr 值显著性降低了 12.53%、26.27% 和 39.76%, 表明测试样品具有长效改善粗糙度的效果。皮肤平滑度 SEsm 值显著性降低了 12.55%、18.39% 和 30.25%, 表明测试样品具有长效平滑肌肤的效果。最后, 皮肤鳞屑指数 DI 值显著性降低了 4.32%、14.60% 和 18.76%, 表明测试样品具有长效去角质的功效。由此推测, 枯草芽孢杆菌酶作为一种温和去角质功效原料, 有望替代传统去角质原料应用到面部护肤产品中。

参考文献:

- [1] TREVISOL T C, HENRIQUES R O, SOUZA A J A, *et al.*
An overview of the use of proteolytic enzymes as exfoliating

- agents[J]. J Cosmet Dermatol, 2022, 21(8):3300-3307.
- [2] VENETIKIDOU M, LYKARTSI E, ADAMANTIDI T, *et al.*, Proteolytic Enzyme Activities of Bromelain, Ficin, and Papain from Fruit By-Products and Potential Applications in Sustainable and Functional Cosmetics for Skincare, Applied Sciences, 2025.
- [3] 曾伶俐. 不同信号肽对脂肪酶 A 在枯草芽孢杆菌中分泌表达的影响 [D]. 2009.
- [4] 国家标准委. GB/T 23527.1-2023, 酶制剂质量要求 第 1 部分: 蛋白酶制剂 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会, 2023.
- [5] 刘唯一, 周琳 和赵华. 化妆品功效评价 (X III) ——消费者使用测试 [J]. 日用化学工业, 2021, 51(06):485-490.
- [6] HSU C K, CHENG N Y, YANG C C, *et al.* Investigating the clinical implication of corneometer and mexameter readings towards objective, efficient evaluation of psoriasis vulgaris severity[J]. Sci Rep, 2022, 12(1):7469.
- [7] EZERSKAIA A, RAS A, BLOEMEN P, *et al.* High sensitivity optical measurement of skin gloss[J]. Biomed Opt Express, 2017, 8(9):3981-3992.
- [8] ZUO Y, LI A, HE H, *et al.* Assessment of features in facial hyperpigmentation: Comparison study between VISIA and CSKIN[J]. Skin Res Technol, 2022, 28(6):846-850.
- [9] ALONSO-BARTOLOMÉ R, RODRÍGUEZ D P, RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ P, *et al.* Method R: Efficacy of a cosmetic routine comprising six topical lipid-encapsulated products[J]. J Cosmet Dermatol, 2022, 21(10):4422-4432.
- [10] ZHENG K, WANG W N, YANG J H, *et al.*, The Anti-Acne and Reduction of Hyperpigmentation Effects of Products Containing Retinol, Niacinamide, Ceramides, and Dipotassium Glycyrrhizinate in Chinese Women, Cosmetics, 2025.
- [11] STETTLER H, CROWTHER J, BOXSHALL A, *et al.*, Biophysical and Subject-Based Assessment of the Effects of Topical Moisturizer Usage on Xerotic Skin—Part II: Visioscan® VC 20plus Imaging, Cosmetics, 2022.