

皮肤光老化的光学评价与治疗技术研究进展探析

韩梅 马文字 (通讯作者)

青海大学附属医院 青海 西宁 810000

【摘要】：皮肤光老化是长期紫外线辐射诱导的皮肤结构和功能退化性改变，严重影响外观与健康。本文系统综述皮肤光老化的光学评价技术与治疗手段研究进展，聚焦光学成像技术在皮肤光老化评估中的应用，包括皮肤镜、共聚焦激光扫描显微镜、光学相干断层成像等无创检测技术，以及光谱分析、荧光成像等功能评估方法。治疗技术部分重点阐述激光疗法、强脉冲光、射频技术等物理治疗手段，结合光动力疗法、LED光疗等新兴技术的作用机制与临床证据。研究表明，光学评价技术正朝着多模态、高分辨率、功能化方向发展，而治疗技术则趋向于精准化、联合化与智能化。未来需进一步探索光学技术在皮肤光老化早期诊断及个体化治疗中的应用，推动光老化防治领域的技术创新。

【关键词】：皮肤光老化；光学评价；激光治疗；强脉冲光；光学相干断层成像

DOI:10.12417/2705-098X.26.01.025

引言

皮肤光老化是指皮肤长期暴露于紫外线（UV）辐射后，出现的以皱纹加深、色素沉着、弹性纤维变性为主要特征的退化性改变。流行病学调查显示，紫外线辐射是皮肤老化的主要环境因素，约80%的皮肤老化现象与光老化相关^[1]。光老化不仅影响皮肤外观，还增加皮肤癌发病风险，已成为医学美容与皮肤病学领域的研究热点。光老化的病理机制涉及紫外线诱导活性氧（ROS）产生，激活基质金属蛋白酶（MMPs）降解胶原纤维；破坏皮肤屏障功能，导致水分流失与炎症反应；影响黑色素细胞功能，引发色素分布异常^[2]。传统的皮肤光老化评估依赖肉眼观察与主观评分，缺乏量化指标与客观依据。随着光学技术的发展，无创性光学评价方法为光老化的精准诊断提供了新工具，而光学治疗技术的进步则推动了光老化干预手段的革新。

本文从光学评价与治疗两个维度，系统梳理皮肤光老化领域的技术进展，分析现有方法的优势与局限，为临床实践与科研创新提供参考。

1 皮肤光老化的光学评价技术

1.1 形态学评价技术

临床主要采用皮肤镜、共聚焦激光扫描显微镜以及光学相干断层成像方式来进行皮肤光老化的形态学评价。皮肤镜是皮肤科常用的无创检测工具，能够通过偏振光或者非偏振光方式放大皮肤表面结构，观察患者光老化皮肤色素异常和血管变化。皮肤镜在进行皮肤光老化评估中能够有效识别脂溢性角化、日光性黑子等特征性皮肤损伤，同时还能对色素斑的大小、

颜色以及分布进行量化^[3]。偏振光皮肤镜结合数字图像分析技术能够有效实现皮肤纹理粗糙度的评估，与传统的主观评估方法的一致性高达82%^[4]。但是，皮肤镜的分辨率仅适合表皮层的形态学评价，无法有效进行真皮层胶原纤维改变的评价。共聚焦激光扫描显微镜（CLSM）是通过激光束对皮肤层进行断层扫描来获取细胞水平的高分辨率图像。在皮肤光老化的形态学评价中可以有效观察表皮突扁平化、黑色素细胞分布异常等早期改变，以及真皮层弹性纤维团块形成^[5]。光学相干断层成像（OCT）是基于低相干光干涉原理的皮肤光老化形态学评价技术，能够通过非入侵断层扫描方式对皮肤进行实时观察。光老化皮肤的OCT图像表现为真皮-表皮交界模糊、胶原纤维排列紊乱及弹性纤维沉积^[6]。

1.2 功能学评价技术

皮肤光老化的功能性评价主要采用光谱分析技术、荧光成像技术、拉曼光谱技术来实现。光谱分析技术主要采用紫外-可见光光度法（UV-Vis）来测量皮肤对不同波长光的吸收特性，从而分析皮肤的黑色素含量与血红素浓度。光老化皮肤的UV-Vis光谱表现为280nm处黑色素吸收峰增强，540nm处血红素吸收峰减弱，与色素沉着及毛细血管扩张的临床表现一致^[7]。自发荧光成像利用皮肤内源性荧光物质的荧光特性评估组织状态。光老化皮肤的自发荧光图像显示胶原荧光强度减弱，弹性纤维荧光增强，与组织病理学结果高度吻合^[8]。拉曼光谱通过分析光子与分子的非弹性散射，提供皮肤分子组成的指纹图谱。光老化皮肤的拉曼光谱显示胶原特征峰强度减弱，弹性蛋白峰增强，且脂质峰的不饱和指数降低，提示脂质成分改变^[9]。

作者简介：姓名：韩梅，民族：撒拉族，籍贯：青海循化，性别：女，出生年月日：1993年1月学历：硕士研究生，部门科室：皮肤病与性病学，职务：无，职称：住院医师，研究或发展方向：临床医疗技能训练与研究。

通讯作者：姓名：马文字，籍贯：青海西宁，性别：女，出生年月日：1973年1月民族：汉族学历：硕士研究生，部门科室：皮肤病与性病学，职务：副主任，职称：主任医师，研究或发展方向：临床医疗技能训练与研究。

2 皮肤光老化的光学治疗技术

2.1 激光治疗技术

皮肤光老化临床治疗中主要采用剥脱性激光、非剥脱性激光以及色素选择激光进行治疗。剥脱性激光治疗技术主要采用CO₂激光通过热效应气化表皮并刺激真皮胶原重塑，是治疗光老化皱纹的金标准。传统CO₂激光的剥脱深度达300-500μm，可显著改善重度光老化皱纹，但术后红斑期长达2-4周^[10]。fractional CO₂激光通过微束模式减少热损伤，愈合时间缩短至5~7d，临床研究显示其对光老化皱纹的改善率达65%~80%^[11]。非剥脱性激光治疗技术则是采用铒激光通过选择性加热真皮层，诱导胶原新生而不破坏表皮屏障。与剥脱性激光相比，非剥脱性激光的术后恢复期仅1~3d，适用于轻中度光老化治疗^[12]。临床数据显示，1550nm fractional 激光治疗3次后，皮肤弹性改善率达45%，色素沉着减轻38%^[13]。色素选择性激光治疗则是通Q开关翠绿宝石激光、红宝石激光可选择性破坏光老化引起的异常黑素颗粒，对日光性黑子的清除率达80%~90%^[14]。最新研究表明，皮秒激光联合点阵激光可同时改善光老化的色素异常与皱纹，协同效应使总体疗效提升40%^[15]。

2.2 强脉冲光技术

强脉冲光技术（IPL）在皮肤光老化治疗中是通过宽谱脉冲光产生光热作用，同时改善光老化的血管异常与色素沉着。DPL技术将波长限定在550~650nm，提高了血管与色素的选择性吸收，减少表皮热损伤^[16]。临床研究显示，IPL治疗4~6次后，光老化皮肤的Glogau评分改善率达55%~70%，且不良反应发生率低于激光治疗^[17]。

2.3 射频技术

射频技术（RF）是通过高频电磁波产生电阻热，加热真皮深层促进胶原纤维收缩与新生。单极RF的穿透深度达3~5mm，对皮肤松弛的改善显著，但温度控制难度大；双极RF的能量分布更均匀，适合浅表光老化治疗；多极RF结合点阵技术，可实现能量的精准调控^[18]。微针RF技术通过绝缘微针将RF能量直接送达真皮层，减少表皮损伤，临床数据显示MNRF对光老化皱纹的改善率达60%~75%，且术后恢复期仅2~3d^[19]。

2.4 新兴光学治疗技术

新兴光学治疗技术主要包括光动力疗法、低能量激光/LED光疗法以及脉冲染料激光疗法。光动力疗法（PDT）是通过外用光敏剂结合特定波长光源，诱导光化学反应产生单线态氧，选择性破坏异常增殖的角质形成细胞与黑素细胞。在光老化治疗中，PDT可改善皮肤粗糙、减少细纹，并具有预防光老化相关皮肤癌的作用^[20]。相关试验显示，ALA-PDT治疗3次后，光老化皮肤的皱纹评分降低42%，且对日光性角化病的清除率达91%^[21]。低能量激光（LLLT）与LED光疗通过光生物调节

作用，促进成纤维细胞活性与胶原合成。633nm红光LED可增加I型胶原mRNA表达，改善皮肤弹性；近红外光可穿透更深层组织，刺激血管新生^[22]。临床研究表明，LED光疗每周3次，持续8周后，光老化皮肤的水分含量增加28%，经皮水分丢失减少22%，适合敏感肌与术后修复^[23]。脉冲染料激光（PDL）疗法主要用于皮肤光老化相关的血管异常治疗，通过选择性光热作用闭合异常血管。临床数据显示，PDL对光老化血管病变的清除率达75%~85%，且对表皮黑素的影响极小，适合肤色较深的光老化患者^[24]。

3 光学技术在皮肤光老化应用中的挑战与展望

3.1 现有技术的局限性

CLSM的穿透深度局限于真皮浅层，无法评估深层弹性纤维变性；OCT的分辨率难以识别早期胶原微结构变化；光谱分析技术对组织微环境的敏感性不足。剥脱性激光的术后恢复期长，限制了其在繁忙人群中的应用；IPL的疗效个体差异大，缺乏精准的治疗参数预测模型；新兴技术如PDT的光敏剂皮肤渗透性不稳定，影响治疗一致性。

3.2 未来发展方向

（1）多模态光学评价系统的智能化：结合人工智能（AI）与机器学习技术，构建多模态光学数据的智能分析平台。如利用卷积神经网络（CNN）对CLSM与OCT图像进行自动分割，量化胶原纤维密度与排列方向；通过机器学习算法整合光谱数据与临床指标，建立光老化程度的预测模型。

（2）光学治疗技术的精准化与个性化：基于光学评价数据制定个体化治疗方案，对胶原严重流失的光老化皮肤，优先选择剥脱性激光或RF深层治疗；对色素异常为主的患者，采用皮秒激光联合IPL的序贯治疗。最新的光学活检技术，通过拉曼光谱实时监测治疗过程中的分子变化，实现能量参数的动态调整。

（3）新型光学材料与技术的开发：研发可激活内源性修复的光学响应材料，近红外光响应的纳米载体可在808nm激光照射下释放生长因子，增强胶原合成；光响应性水凝胶通过450nm蓝光调控降解速率，实现药物的精准释放^[45]。超表面光学技术的发展，有望开发出可定制波长的微型光疗设备，实现家用化的光老化预防与治疗^[46]。

（4）联合治疗策略的优化：探索不同光学技术的协同作用机制，激光预处理增加皮肤渗透性，提高后续PDT的光敏剂吸收效率；IPL联合射频的光电协同，同时改善表皮与真皮的光老化改变。临床研究表明，CO₂激光联合PDL的序贯治疗，对重度光老化的总体改善率达85%，优于单一疗法^[47]。未来需通过多中心随机对照试验，建立标准化的联合治疗方案。

4 结论

皮肤光老化的光学评价与治疗技术已取得显著进展，从单

一形态学评估发展至多模态功能分析,从破坏性治疗演进至精准化干预。光学评价技术正朝着高分辨率、功能化、智能化方向发展,而治疗技术则趋向于微创化、个性化与联合化。然而,现有技术在复杂皮损的综合评估、个体差异的精准调控等方面

仍存在不足。未来需进一步整合光学技术与分子生物学、人工智能等学科,开发兼具诊断与治疗功能的一体化系统,推动皮肤光老化防治领域的技术革新,为临床提供更精准、安全、有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 赵婧琪,张小卿,吴景东.皮肤光老化发生发展的自噬机制[J].实用中医内科杂志,2023,37(12):78-80.
- [2] 魏晓歌,宋斐,杨楠,等.枸杞叶总黄酮保护皮肤光老化损伤的作用机制[J].中国皮肤性病学杂志,2025,39(4):376-385.
- [3] 耿雅琼,陈晓辉,田伟,等.非剥脱性 1565nm 点阵激光联合强脉冲光治疗面颈部皮肤光老化疗效分析[J].中国美容医学,2025,34(6):119-122.
- [4] 赵杰,曹文婷.转录组学在皮肤光老化研究中的应用[J].中国皮肤性病学杂志,2023,37(10):1206-1210.
- [5] 孙琳,张曼.白花泡桐叶片提取物的抗皮肤光老化作用研究[J].日用化学工业(中英文),2024,54(9):1092-1098.
- [6] 宋晗,郑世军.强脉冲光治疗皮肤光老化的临床效果评价[J].中国医疗美容,2023,13(1):24-27.
- [7] 林孟盈,项蕾红.光动力疗法在皮肤光老化治疗中的应用[J].国际皮肤性病学杂志,2007,33(6):334-336.
- [8] 万慧,曾山鹰.射频联合强脉冲光在面部皮肤光老化治疗中的应用[J].现代养生(下半月版),2017(4):67.
- [9] 何翠英.点阵激光用于面部皮肤光老化治疗的效果及其对毛细血管扩张的影响[J].中国实用医药,2019,14(14):92-93.
- [10] 程雯,贺冬云.非剥脱性点阵激光联合无痛水光注射治疗面部皮肤光老化的疗效观察[J].中国美容医学,2024,33(3):116-119.
- [11] 廖建伟,郭玉瑞,王时雨,等.CO₂点阵激光联合重组牛碱性成纤维细胞生长因子治疗面部皮肤老化的疗效分析[J].临床医学,2024,44(6):61-63.
- [12] 王彬.超脉冲点阵 CO₂激光在不同治疗参数下对人体光老化前臂皮肤的临床及实验室研究[D].辽宁:中国医科大学,2014.
- [13] 刘楠.强脉冲光、近红外线、像素激光联合治疗手部皮肤光老化的观察[D].辽宁:中国医科大学,2013.
- [14] 尚君兰.1320nmND:YAG 激光治疗皮肤光老化的动物实验研究[D].河南:郑州大学,2012.
- [15] 吴淑莲.老化皮肤光学特征提取及其治疗过程监测[D].福建:福建师范大学,2011.
- [16] 张国惠.皮肤光老化的分子生物学机制及其防护治疗研究[D].内蒙古医科大学,内蒙古医学院,2007.
- [17] 张海.大气压等离子体对小鼠皮肤组织光老化的治疗效果及作用机制研究[D].辽宁:东北大学,2022.
- [18] 龚玮,谢树森.皮肤光老化的光学评价与治疗技术研究进展[J].激光生物学报,2009,18(5):690-694.
- [19] 陈琳.面部皮肤松弛老化经射频及点阵激光联合治疗 78 例疗效评价[C]//中国中医药信息研究会中西医结合皮肤病分会 2018 第二届学术年会论文集.2018:269-273.
- [20] 姜红伶.强脉冲光与 CO₂点阵激光治疗面部皮肤光老化疗效对比分析[J].中国医疗美容,2022,12(2):25-29.
- [21] 滕伟.CO₂点阵激光治疗面部皮肤光老化临床效果分析[J].医学美容,2021,30(11):35.
- [22] 王哲,刘浩.Pixel ixel Er:YAG 激光治疗面部皮肤老化[C]//第八届中国医师协会美容与整形医师大会暨第一届全国激光美容大会(第二届全国颅颌面专题研讨会论文集.2011:181-183.
- [23] 黄英,苏伟,白丽娜,等.强脉冲光治疗皮肤光老化的临床体会[C]//2009 年京津冀地区皮肤科学术年会论文集.2009:108-110.
- [24] 张洁,罗晓.强脉冲光联合射频治疗面部皮肤光老化的临床体会[J].中国美容医学,2010,19(7):1046-1048.