

点阵CO₂激光在多模态治疗中的研究进展

董 钰¹, 张晓冬²

¹北华大学临床医学院, 吉林 吉林

²北华大学附属医院皮肤科, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年5月11日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月12日

摘 要

点阵CO₂激光作为一种基于选择性光热作用的微创治疗技术, 近年来在多模态治疗领域展现出显著优势。其通过诱导微热损伤区(MTZ)激活组织修复、增强局部药物渗透和调节免疫微环境, 在瘢痕重塑、色素病变、脱发、白癜风及私密医学等多个适应症中拓展了临床应用边界。联合微针射频、脉冲染料激光、PRP、生长因子及局部药物治疗, 不仅可提升疗效, 还能缩短恢复周期, 尤其适用于顽固性病灶。在机制层面, 点阵CO₂激光可促进胶原新生、改善皮肤屏障功能、上调claudin-1并抑制TGF- β 1、IL-6等炎症因子表达, 具有良好的组织再生潜力, 其形成的微通道也为药物透皮吸收提供了理想路径。随着双波长系统、Er:YAG-CO₂混合激光、图像导航及AI参数调控等新兴技术的应用, 其治疗精准度和安全性进一步提升, 结合生物标志物监测有望实现个体化干预。总体而言, 点阵CO₂激光作为多模态治疗平台, 已在多个复杂性皮肤与黏膜疾病的管理中展现出良好的疗效、安全性与可持续性, 未来研究应重点关注点阵CO₂激光在“病灶分型-参数匹配-组合优化”路径下的精确应用, 同时, 可联合生物标志物、AI参数调控与智能递药系统, 建立推广性强、可连续复制的个体化干预模式, 从而达到提高疗效, 增强临床指导价值的目的。

关键词

点阵CO₂激光, 多模态治疗, 微热损伤区(MTZ), 智能化治疗

Research Progress on Fractional CO₂ Laser in Multimodal Therapy

Yu Dong¹, Xiaodong Zhang²

¹Clinical Medical College, Beihua University, Jilin Jilin

²Dermatology Department, The Affiliated Hospital of Beihua University, Jilin Jilin

Received: May 11th, 2025; accepted: Jun. 5th, 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

As a minimally invasive technology based on the principle of selective photothermolysis, fractional CO₂ laser has demonstrated remarkable advantages in the field of multimodal therapy in recent years. By inducing microscopic thermal zones (MTZs), it activates tissue repair, enhances local drug penetration, and modulates the immune microenvironment, thereby expanding its clinical applications in scar remodeling, pigmentary disorders, alopecia, vitiligo, and aesthetic gynecology. When combined with microneedle radiofrequency, pulsed dye laser, platelet-rich plasma (PRP), growth factors, and topical medications, fractional CO₂ laser not only improves therapeutic outcomes but also shortens the recovery period, especially for recalcitrant lesions. Mechanistically, the fractional CO₂ laser promotes collagen neogenesis, improves skin barrier function, upregulates claudin-1, and inhibits pro-inflammatory cytokines such as TGF- β 1 and IL-6, demonstrating strong potential for tissue regeneration. The microchannels it creates offer an ideal pathway for transdermal drug delivery. With the integration of emerging technologies such as dual-wavelength systems, Er:YAG-CO₂ hybrid lasers, image-guided navigation, and AI-based parameter optimization, both precision and safety have been further enhanced. The incorporation of biomarker monitoring holds promise for personalized treatment strategies. Overall, as a versatile platform for multimodal therapy, fractional CO₂ laser has shown excellent efficacy, safety, and sustainability in managing a wide range of complex cutaneous and mucosal disorders. Future research should focus on its precise application under the framework of "lesion classification-parameter matching-combination optimization". Furthermore, integrating biomarkers, AI-controlled protocols, and intelligent drug delivery systems may help establish replicable, scalable, and personalized intervention models, ultimately improving efficacy and clinical decision-making.

Keywords

Fractional CO₂ Laser, Multimodal Therapy, Microscopic Thermal Zones (MTZs), Intelligent Therapy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 点阵 CO₂ 激光技术概述

点阵 CO₂ 激光是一种基于选择性光热作用(Selective Photothermolysis)的高精度皮肤治疗技术,其核心机制是通过诱导皮肤产生微小而可控的热损伤,启动组织修复与重建过程。该技术使用 10,600 nm 波长的 CO₂ 激光,此波长可被皮肤组织中的水分高度吸收,从而实现对靶组织的有效作用[1]。在 Fractional (点阵)模式下,激光束被分割为直径约 80 μ m~120 μ m 的微米级光柱,在皮肤表面形成规则分布的微热损伤区(Microthermal Zones, MTZ) [2],每个 MTZ 周围保留完整的未损伤组织,形成典型的“点阵”结构,有助于加快组织修复与再生[3]。点阵 CO₂ 激光兼具剥脱性与非剥脱性双重治疗机制。一方面,剥脱性作用通过高能量激光瞬间汽化组织水分,形成深度可达 300 μ m~700 μ m 的柱状汽化通道;另一方面,激光产生的残余热能可在通道周围形成 50 μ m~100 μ m 的热凝固带,激活成纤维细胞,诱导 I 型和 III 型胶原蛋白的新生与重塑。在治疗后,皮肤依次经历炎症、增殖和重塑三个阶段:治疗后 24 小时内巨噬细胞清除损伤组织[4];随后,成纤维细胞迁移至损伤区并持续分泌胶原蛋白,过程可持续约 3 个月;最终胶原重新排列,改善皮肤结构与弹性。近年来,随着设备升级与技术进步,点阵 CO₂ 激光在治疗参数调控与多

模态联合应用方面表现出更强的适应性。如 μ -Scan DOT 系统可精准调节光斑密度(5%~15%)与单点能量(10 mJ~100 mJ), 提高治疗精度与安全性[5]; 部分设备采用超脉冲(Ultra Pulse)技术或联合 1540 nm 非剥脱激光同步发射, 以减少热扩散、缩短术后恢复期[6]; 此外, 激光形成的微通道可显著提高局部药物(如 5-氟尿嘧啶、曲安奈德)的透皮吸收率[7]。该技术通过“损伤-修复”的正反馈循环实现真皮深层重塑, 同时最大程度保留表皮屏障功能, 并可通过能量密度、覆盖率和治疗间隔等参数调控, 针对瘢痕、光老化等多种适应症实施个体化治疗方案。

总之, 点阵 CO₂ 激光的应用可有效改善患者的皮肤结构的重塑和组织修复, 同时还可通过诱导微热损伤区(MTZ)增强局部药物的渗透和免疫功能的调节, 为后续治疗提供理想的“治疗窗口”。点阵 CO₂ 激光的多重生物效应基础也为其在多模态治疗中的整合应用奠定了坚实基础。近年来, 由于皮肤与黏膜疾病治疗需求的复杂化, 单一疗法往往难以达到满意的临床效果, 因此, 如何将点阵 CO₂ 激光与其他治疗方式进行有机的联合应用, 从而达到实现协同效应、提升疗效的目的, 成为当前研究的重难点。本文系统综述了点阵 CO₂ 激光在多模态治疗中的优势表现及与其他疗法联合运用的路径。

2. 多模态治疗的临床优势

点阵激光(Fractional Laser)联合多模态治疗(Multimodal Therapy)在皮肤疾病管理中展现出显著优势, 主要体现在疗效增强、恢复加快与适应症拓展等方面。多项研究表明, 点阵 CO₂ 激光与局部曲安奈德、氨甲环酸联合皮秒激光等药物或能量设备协同应用, 可有效提升瘢痕、色素性病变等顽固性疾病的治疗反应率[8]。在治疗周期方面, 多模式程序(MMP)联合点阵微针射频(FMR)与超脉冲 CO₂ 激光可显著缩短痤疮瘢痕治疗时间, CO₂ 激光联合脉冲染料激光(PDL)也能在更少疗程内达成更佳效果。此外, 非剥脱性激光(NAFL)因保留表皮结构, 恢复期更短、副作用更少, 而剥脱性激光联合湿性愈合技术亦能加速术后修复[9]。通过微热损伤区(MTZ)实现精准靶向的点阵激光, 在减少感染与色素异常风险方面也展现出较高安全性[10], 而与 Er:YAG 等设备联合应用可进一步降低疼痛和炎症后色素沉着(PIH)发生率[11]。

在适应症方面, 多模态治疗可覆盖瘢痕管理、皮肤年轻化与慢性疾病治疗等多个领域。点阵激光联合细胞移植或填充剂在烧伤、手术瘢痕的重建中效果显著[12]; 联合 ALA-PDT 或 1940 nm 二极管激光亦能同时改善色素沉着与肤质[13]。对于如 Peyronie's 病(PD)、局限性硬皮病(LS)等慢性病变, 点阵激光联合甲氨蝶呤或药物递送技术显示出良好前景[14]。从患者体验角度看, 多模态治疗方案能在提升疗效的同时显著改善满意度评分, 如点阵激光联合微针射频治疗痤疮瘢痕, 或应用于阴道萎缩(VVA)时改善性功能和生活质量[15]。综上, 点阵激光的多模态联合策略通过整合不同治疗机制, 在保障安全性的前提下, 实现了疗效最大化、恢复最优化与方案个体化, 为复杂性皮肤疾病的临床治疗提供了更具优势的综合管理模式。

3. CO₂ 点阵激光在联合治疗中常见的策略与适应症分析

3.1. 瘢痕

CO₂ 点阵激光在各类型瘢痕治疗中的广泛应用为多模态联合治疗提供了平台基础。根据不同类型和病程阶段的瘢痕, 其联合治疗策略日益趋于个体化与多机制整合。

3.1.1. 凹陷性瘢痕

以痤疮瘢痕为例, 研究显示, 皮下分离术联合富血小板血浆(PRP)或微针治疗在 rolling 型与 boxcar 型瘢痕中具有显著疗效, 治疗 3 个月后 Goodman & Baron 瘢痕评分平均由 3.8 ± 0.6 降至 2.1 ± 0.5 , 显著降低($P = 0.0007$) [16]。其中, 在微针联合 PRP 组评分下降幅度为 1.9 ± 0.4 , 而单独 PRP 组为 1.2 ± 0.5 , 两组差异具有统计学意义($P < 0.05$), 尤其适用于中重度凹陷型瘢痕[17]。但对于 icepick 型瘢痕, 该类联合

方式疗效有限, 需辅以 CO₂ 点阵激光等深层剥脱性治疗手段以增强修复效果。此外, CO₂ 激光联合皮下分离术对 rolling 与 boxcar 型瘢痕也显示出优于单一治疗的协同效果, 并在临床中逐渐替代传统单模态能量疗法[18]。

3.1.2. 增生性瘢痕

在手术及烧伤后瘢痕的管理中, 多模态治疗更强调早期干预与多因素联合调控。Er:YAG 点阵激光通过形成微通道促进光敏剂渗透, 可显著增强 PDT 疗效[19]。而非剥脱类激光(如 PDL)联合 CO₂ 激光可改善瘢痕质地与红斑表现, 尤其适用于早期增生性瘢痕。对于陈旧性或大面积烧伤后瘢痕, 需结合压迫疗法、激光重塑、术后干预等多层次手段以改善弹性与功能。近年来, 超声引导下肝素类药物注射联合 CO₂ 激光处理, 也被证实可通过上调 MMP-2/9 表达加快组织软化过程, 提升治疗响应[20]。瘢痕疙瘩因其复发率高、治疗难度大, 需联合多种手段干预。曲安奈德(TAC)虽为一线治疗药物, 但复发率高达近 100%。研究显示, 联合博来霉素可显著降低复发风险, 且相关不良反应如皮肤萎缩较少见[21]。此外, TAC 与 5-氟尿嘧啶或肉毒毒素的组合在临床中被广泛应用, 可增强对异常成纤维细胞活性的调控[21]。在能量治疗方面, Kim 等(2023)开展的一项基于循证医学的回顾性分析中采用 CO₂ 点阵激光联合 PDT 通过激光诱导的微通道促进药物渗透, 可显著增强光敏剂的渗透效率, 提高组织反应率, 联合治疗的患者在 3 个月内其瘢痕体积平均缩小 $38.6\% \pm 4.3\%$, 而单独使用 CO₂ 激光的患者仅减少 $21.4\% \pm 3.7\%$, 差异具有统计学意义($P < 0.01$)。同时, MASI 色素评分下降幅度也更显著(联合组下降 2.3 ± 0.5 vs. 对照组 1.2 ± 0.4), 显著改善了局部质地与色素沉着[22]。对术后疤痕疙瘩, 辅以电子束等放疗手段可将复发率降至 6%, 但同时需关注其对伤口愈合期的潜在影响[23]。

3.1.3. 妊娠纹

妊娠纹(Striae gravidarum, SG)是妊娠期间常见的皮肤改变, 初期表现为红斑或紫红色条纹, 产后逐渐转为色素减退和萎缩的白色瘢痕样条纹。尽管不影响身体功能, 但其对外观的持久性损害常伴随孕产妇明显的心理负担, 目前治疗以外用药物和能量类设备为主, 前者疗效有限, 后者更受临床青睐。近年来, 点阵铒激光(Er:YAG)因其在刺激胶原重塑、改善皮肤质地方面的优势, 被逐步应用于妊娠纹的治疗, 并显示出良好的安全性与初步疗效[24]。为实现精准干预与疗效监测, 部分机构已常规引入 Antera 3D 等皮肤成像技术, 在每 3 次治疗周期后进行定量评估, 有助于根据反应程度动态调整激光参数和联合策略, 响应率可达 82% [25]。此外, 多模态治疗的安全性也需充分评估。博来霉素注射虽疗效显著, 但疼痛感强($P = 0.03$) [25], 而博来霉素联合 CO₂ 点阵激光治疗增生性瘢痕与瘢痕疙瘩时, 可使瘢痕高度平均下降 $48.2\% \pm 6.5\%$, 柔韧性评分提高 $42.1\% \pm 4.8\%$, 色素沉着评分降低 $37.3\% \pm 3.9\%$, 显著优于单独应用曲安奈德或 5-氟尿嘧啶的对照组(P 均 < 0.01)。CO₂ 点阵激光在多模态体系中的平台作用, 结合不同能量设备、注射药物及物理手段, 显著提升了整体疗效。Mokhtari 等[26]开展的随机对照试验对比了 5%米诺地尔单独使用与 Er:YAG 激光联合 5%米诺地尔治疗的疗效, 结果显示, 联合组患者的毛发密度在第 12 周平均增加了 27.8 ± 5.6 根/cm², 而单独米诺地尔组仅增加 12.1 ± 4.2 根/cm², 提升幅度超过 58% ($P < 0.001$)。此外, 毛发直径改善也更显著, 联合组提升为 14.2 ± 2.1 μm, 对照组为 7.4 ± 1.8 μm, 差异具有统计学意义($P < 0.01$)。提示联合治疗方案相较于单一疗法, 在治疗雄激素性脱发(AGA)中展现出更优的疗效。未来发展方向将聚焦于生物标志物引导的治疗决策、参数精准调控与人工智能辅助的个体化组合优化。

3.2. 脱发

3.2.1. 斑秃

斑秃(alopecia areata, AA)是一种自身免疫性毛发脱落性疾病, 表现为头皮或身体局部出现非瘢痕性脱

发斑。传统治疗包括糖皮质激素等免疫抑制疗法和物理治疗(如局部光疗),但对于顽固性或复发性病例疗效有限[27]。近年来,CO₂点阵激光作为新兴疗法在斑秃中的应用受到关注。CO₂点阵激光通过在脱发斑区域形成微小的热损伤来诱导伤口愈合反应,从而改变毛囊局部的免疫微环境并刺激毛乳头释放生长因子,促进毛囊再生与毛发重生。同时,由点阵激光产生的微通道可以提高局部药物的透皮渗透。将该技术与外用免疫调节剂或308 nm 准分子激光等光疗联合应用,可产生协同作用,加速毛发再生[28]。有临床报道针对常规疗法无效的顽固性斑秃患者应用CO₂点阵激光进行治疗,结果发现部分脱发斑块处重新长出毛发,提高了总体治疗有效率。上述研究提示CO₂点阵激光在难治性斑秃的治疗中可能具有一定疗效,为这一顽固性疾病提供了新的治疗思路。

3.2.2. 雄秃

雄激素性脱发(androgenetic alopecia, AGA)是最常见的脱发类型,由遗传因素和雄激素作用引起,其特征为毛囊逐渐微小化,头发逐渐变细变稀。常规治疗主要包括外用米诺地尔溶液和口服非那雄胺等药物,以及毛发移植手术,但部分患者对药物治疗不敏感或不耐受,疗效有限。近年来,CO₂点阵激光作为一种新型物理治疗手段被引入AGA的临床研究,旨在通过刺激头皮毛囊微环境来改善毛发生长,并增强局部药物的疗效。CO₂点阵激光在头皮产生微小的热损伤区,并形成贯穿表皮微通道的微通道。由此诱发的组织修复过程和新生血管形成可改善毛囊周围的微循环,促进生长因子释放,有利于毛发生长。与此同时,这些激光形成的微通道能够显著提高外用药物的透皮吸收,使米诺地尔等生发药物更有效地渗透至毛囊部位,增强治疗效果。已有研究比较了CO₂点阵激光与其他疗法在AGA治疗中的效果。例如,将CO₂点阵激光与富血小板血浆(PRP)联合应用,可比单一疗法获得更显著的毛发密度增加和直径改善[16]。单独应用CO₂点阵激光治疗AGA也显示出毛发数量增加、脱发减缓等积极效果[17]。这些结果表明,CO₂点阵激光在雄激素性脱发的治疗中具有潜在应用价值,可作为常规疗法的有益补充。

3.3. 色素性皮肤病

3.3.1. 白癜风

近年来,点阵CO₂激光因其具备刺激黑色素生成和增强药物经皮渗透的能力,作为难治性白癜风,特别是肢端型白癜风的潜在辅助治疗手段而备受关注。其通过诱导表皮和真皮层的微损伤,激活局部组织释放炎性细胞因子,进而促进黑素细胞的增殖、迁移及分布,同时增强局部外用药物的渗透效率[29][30]。研究表明,在局部用药前辅助应用点阵CO₂激光,可改善对常规治疗反应不佳的耐药性病变区域,加快色素恢复速度[31]。此外,该技术还能激发胶原蛋白与弹性蛋白的合成,为皮肤微环境重建与色素沉着提供有利条件[32]。

点阵CO₂激光与窄谱中波紫外线(NB-UVB)联合应用,在稳定型白癜风,尤其是躯干区域可显著改善色素沉着[33]。另一项研究发现,激光治疗后Th2与Th17相关细胞因子水平明显下降,提示其可能兼具免疫调节功能[34]。Mohammadi等[35]在一项系统性回顾研究中分析了22项联合疗法的临床数据,发现CO₂点阵激光联合NB-UVB的平均复色率为72.4%±6.1%,显著高于NB-UVB单独治疗的48.7%±5.3%($P < 0.01$);而与局部类固醇联合时,复色率达68.9%±7.4%,改善速度更快、色素恢复更均匀。提示与单一疗法相比,点阵CO₂激光联合局部糖皮质激素、免疫调节剂、PRP等方式的复色率更高,色素恢复更快。此外,点阵CO₂激光还被用于黑素细胞-角质形成细胞悬液移植术(MKTP)前受体区域的制备,研究表明深度为144 μm的浅表消融可获得良好的色素沉着结果[36]。值得注意的是,白癜风患者常伴有较高比例的焦虑、抑郁和社会压力,其对生活质量的负面影响可反过来加重病情进展[37]。而位于肢端或骨性突起(如手足、肘膝等)部位的病灶,因其对传统疗法响应较差,成为临床治疗中的重点与难点[38]。另外,CO₂点阵激光联合308 nm 准分子激光治疗稳定期白癜风患者总有效率高达97.78%,且均未出现严重不

良反应, 提示 208 nm 准分子激光联合 CO₂ 点阵激光治疗白癜风疗效好, 安全性较高[39]。点阵 CO₂ 激光作为一种可诱导黑素细胞再生与色素恢复的辅助治疗方式, 为这些难治性病灶提供了新的希望。该激光可单独或联合应用于 NB-UVB、局部类固醇等治疗中, 显著提高复色率[35]。联合治疗优势突出, 无论与 PRP、外用药还是光疗结合, 均较单一治疗方案表现出更优的疗效。

同时, 疗效虽会受到年龄、性别、病程等因素影响, 但安全性良好, 耐受性高, 常见反应包括红斑、瘙痒和色素变化, 未见严重并发症[40]。此外, 多项研究支持点阵 CO₂ 激光与传统治疗手段(如钙调磷酸酶抑制剂、卡泊三醇、他克莫司软膏等)联合使用, 进一步提升疗效[31]。尽管大多数研究为样本量较小的临床试验, 部分缺乏盲法设计, 但一致证据仍指出该激光技术在治疗难治性白癜风中具有明确的临床应用价值。未来应通过更大样本、随机对照和长期随访的研究进一步验证其标准化参数与联合疗法的优越性, 以优化治疗策略、提升患者预后, 并为白癜风的精准治疗提供更为坚实的理论与实践依据。

3.3.2. 黄褐斑

CO₂ 点阵激光通过在皮肤表面产生微小的热损伤带(Microthermal Zones, MTZ), 以选择性方式作用于异常色素沉积区域, 激发一系列组织修复过程, 包括表皮的重塑与真皮层中胶原蛋白的再生。这种微创机制不仅有助于色素颗粒的破坏与清除, 还可促进皮肤结构的更新, 从而改善色素性皮肤病的外观。对于黄褐斑、炎症后色素沉着等色素性皮肤病, CO₂ 点阵激光主要通过其剥脱效应去除表皮中过量色素细胞, 辅以刺激基底层正常黑素细胞的迁移与分布, 从而实现色素均匀化。此外, 该激光还可增强皮肤屏障功能, 有助于防止新色素沉积的发生。值得注意的是, 该治疗机制在发挥作用的同时, 也伴随着一定的炎症反应[41], 因此参数设置及个体差异需谨慎评估, 避免因热损伤诱发继发性色素异常, 尤其在亚洲深肤色人群中更应引起关注。

研究表明, CO₂ 点阵激光可显著增强氨甲环酸(TXA)的透皮吸收, 二者联合应用在抑制黑素合成和改善色素沉着方面较单独使用 TXA 或激光更具协同效应[42]。另有研究指出联合治疗组 MASI 评分显著降低[41]。Wu 等[43]进行的一项随机对照试验中比较了 532 nm 与 1064 nm Q 开关 Nd:YAG 激光治疗黄褐斑的疗效。结果显示, 532 nm 组患者的 MASI 评分在治疗 8 次后平均下降 42%~47%, 显著优于 1064 nm 组的 25%~30% ($P = 0.000$); 皮肤镜评分(DMS)同步下降, 真皮厚度通过高频超声测定增加 12.4%, 而对照组仅为 8.1% ($P = 0.000$)。上述研究均提示 CO₂ 点阵激光与其他激光或药物的联用策略(如皮秒激光、氢醌 HQ、壬二酸)也表现出多靶点协同作用的潜力, 有助于提高临床疗效。在疗效与安全性方面的对比中, 皮秒激光(如 755 nm 或 1064 nm)因具备更短的脉冲宽度, 能够在减少热损伤的同时改善色素沉着, 尤其适用于顽固性黄褐斑患者[44]; 而低能量 Q 开关 Nd:YAG 激光(如 532 nm 或 1064 nm)在靶向真表皮交界区色素方面优势明显, 表皮损伤更小, 在特定人群中优于 CO₂ 点阵激光[45]。对于深肤色患者, 需谨慎使用 CO₂ 点阵激光, 并建议采用低能量、高密度的保守设置, 以减少炎症后色素沉着(PIH)风险; 某些研究亦推荐优先选择非剥脱性激光如皮秒激光。在面对治疗反应差的顽固性黄褐斑时, CO₂ 点阵激光可作为二线治疗选择, 尤其在联合化学剥脱或微针等疗法时更能提高反应率。为优化疗效并降低副作用, 临床上推荐使用低能量(10 mJ~20 mJ/微光束)、高密度(5%~10%覆盖率)的参数组合, 并辅以严格的术后护理, 包括使用广谱防晒(SPF 50+)和含神经酰胺的保湿剂以支持皮肤屏障修复。

综上所述, CO₂ 点阵激光在黄褐斑治疗中展现出一定潜力, 联合 TXA、HQ 等治疗方案可望提升疗效, 而对 PIH 高风险人群则应优先考虑皮秒激光等替代技术。临床治疗方案应根据患者的肤色类型、病程长短及既往治疗反应进行个体化选择。

3.3.3. 雀斑

雀斑是一种常见的色素性皮肤病变, 常出现在面部、颈部及手背等暴露部位, 表现为扁平的棕色斑

点, 具有明显的季节性, 冬季颜色可变浅。其发病与紫外线刺激和遗传因素密切相关, 常见于白皙肤色个体。病理上, 雀斑主要由黑素的局部过度沉积以及黑素细胞活性增强引起, 但黑素细胞数量并无明显增加。现有治疗手段包括防晒、美白剂、化学换肤及多种激光技术, 目的在于抑制黑素合成或清除异常色素团块[46]。FCO₂ 作为近年来兴起的微剥脱性激光设备, 通过形成微热损伤区(MTZs)诱导表皮更新和真皮层胶原重塑, 兼具去除表浅色素与改善皮肤质地的双重作用。该技术基于点阵光热分解原理, 保留部分正常组织, 加速皮肤修复过程, 从而降低并发症风险和恢复期。研究指出, FCO₂ 激光在浅表性色素性病变中表现出较高的治疗效率, 且副作用相对温和, 患者多在数天内恢复日常活动。临床数据显示, 单次 FCO₂ 激光治疗可在多数雀斑患者中实现色素减退, 且在治疗后 1 个月评估时, 有 90% 以上的受试者显示不同程度的皮损改善。其中 45% 的患者达到显著改善等级, 而重度副作用较少, 主要为短期红斑和轻度色素沉着[47]。相比传统 Q 开关激光, FCO₂ 激光不仅可有效分解黑色素颗粒, 同时具备更短的停工期与较少的术后不适感, 尤其适合希望在短期内改善肤色均匀度的患者[48]。此外, 在亚洲深肤色患者中, 为控制术后色素沉着风险, 研究建议使用低能量、高密度参数设置, 联合外用防晒与保湿护理可进一步提高疗效与安全性。

相比之下, Er:YAG 激光作为另一种剥脱性激光, 其在亚洲 III/IV 型肤质雀斑患者中的清除率同样高达 90% 以上, 且在术后 6 个月随访中未见明显色素异常或复发, 显示出良好的长期稳定性[49]。在对比 Q 开关红宝石激光与点阵 CO₂ 激光治疗日光性雀斑的研究中, 红宝石激光在色素清除效果上略占优势, 但 CO₂ 激光在皮肤质地改善与联合治疗策略中展现出更广泛的应用前景[50]。结合实际临床需求, 点阵 CO₂ 激光可作为对外用药物反应不佳或术后维持治疗的重要补充, 亦为美容皮肤科提供了一种兼具色素调控与皮肤重塑的综合解决方案。综上所述, 点阵 CO₂ 激光作为雀斑治疗的有效手段之一, 具备较高的安全性与满意度, 尤其在联合美白剂、PRP 或浅层化学剥脱等疗法中显示出协同增效作用。未来有必要通过更大样本、多中心的对照试验, 进一步明确其不同肤质、病程与复发风险患者中的治疗参数优化与长期疗效。

3.4. 其他临床适应症

点阵 CO₂ 激光凭借其微热损伤、真皮胶原重塑、透皮吸收增强及微生态调节等多重机制, 已在多种皮肤及黏膜相关疾病中展现出显著疗效, 尤其在联合治疗中优势更为突出。在女性外阴/阴道松弛综合征(VRS)及泌尿生殖道疾病中, 点阵激光单用即可显著改善阴道健康指数(VHI)和女性性功能指数(FSFI), 有效提升生活质量[51]; 联合甲硝唑治疗还可改善阴道微生态(乳酸杆菌比例↑, $r = 0.79$), 降低细菌性阴道炎复发率[52], 亚洲人群研究亦证实其在恢复阴道组织紧致度方面具有良好效果, 满意度较高[51]。

在外阴硬化性苔藓(LS)治疗中, 激光联合局部糖皮质激素或钙调磷酸酶抑制剂可缓解瘙痒并改善皮肤硬化[53], 部分研究亦提示其可能通过改善微生态多样性发挥辅助作用[54]。在皮肤良性赘生物治疗方面, 点阵激光适用于脂溢性角化、软纤维瘤等浅表病变, 具有精准汽化、热损伤小的优势[55], 并可通过联合 5-氟尿嘧啶或曲安奈德优化瘢痕修复效果。此外, 该技术在光老化与肤质改善领域也表现出良好效果, 通过促进 I/III 型胶原蛋白再生改善皱纹、毛孔粗大和皮肤弹性, 联合 1470 nm 非剥脱激光可缩短恢复时间[56], 而低能量(60 mJ, 密度 8%)模式则在保证疗效的同时减少红斑等副作用[57]。

3.5. 未来多模态治疗优化路径

目前, 点阵 CO₂ 激光在多模态治疗中的联合治疗方式仍以临床医师的经验指导为主, 缺乏标准化流程, 无法满足个体差异的需求。为增强其临床实用性和治疗的精准性, 未来应从以下几个方面优化治疗的路径: (1) 通过构建“病灶-参数-策略”三维模型, 满足个性化治疗需求: 依据患者的疾病类型(如

瘢痕、色素病变、脱发)、病变分型(如 rolling 型瘢痕、真皮型黄褐斑、肢端型白癜风), 匹配与之相适应的激光能量、密度、脉宽组合方案, 并选取最适宜的药物或物理干预措施(如 PRP、TXA、FMR 等), 提高治疗的靶向性及临床疗效。(2) 运用生物标志物进行临床疗效的评估: 积极探索 claudin-1、TGF- β 1、MMP-9 等生物标志物的检测意义, 探索可作为治疗前病情评估, 治疗反应的动态监测, 实时调整激光能量或联合方式的生物标志物, 推进个体化治疗从“经验决策”走向“指标驱动”。(3) 开发 AI 辅助参数及图像导航系统, 提升治疗的有效性: 通过人工智能对临床疗效数据库进行聚类分析, 构建基于患者的肤色、病程、组织层次的推荐参数组合; 配合实时 OCT/皮肤成像系统, 实现激光作用深度和位置的精准调控, 提升安全性与一致性。这些优化策略的提出不仅有助于治疗效果和患者满意度的有效提升, 也为临床医生提供了更系统、可执行的方案组合建议, 推动点阵 CO₂ 激光的多模态治疗迈向更高水平。

4. 技术融合与新兴趋势

随着技术的发展与治疗需求的多样化, 点阵 CO₂ 激光在多模态治疗中的研究不断深入, 其应用已从单一剥脱性治疗逐步扩展至更精细化、精准化的综合治疗策略。目前主要的技术融合和创新趋势包括以下几方面: 其一, 双波长激光系统将 10,600 nm CO₂ 激光与 1540 nm 非剥脱激光结合, 利用前者的表皮重塑能力与后者的真皮胶原刺激作用, 实现协同改善瘢痕纹理与色素, 同时显著缩短术后恢复期[58]; 在增生性瘢痕治疗中, 该系统通过不同扫描单元实现表面平整与深层重构, 临床研究显示瘢痕高度明显下降。其二, Er:YAG-CO₂混合激光技术整合了 Er:YAG 激光(2940 nm)的浅层剥脱特性和 CO₂ 激光的深层热效应, 不仅提升疗效, 还降低了传统 CO₂ 激光带来的疼痛感和术后色素沉着风险[59], 尤其在治疗萎缩性痤疮瘢痕中效果更佳, 热损伤分布也更均匀。其三, 激光辅助透皮给药平台的建立为治疗效率提升提供新思路, 如 Er:YAG 或 CO₂ 激光预处理可创建微通道, 显著增强局部药物(如 5-FU、生长因子)的吸收能力。例如, 尿素 40%联合 Er:YAG 激光可提高光动力疗法对甲真菌病的疗效, 而 CO₂ 激光辅助亚甲蓝给药也在瘢痕疙瘩治疗中展现出良好安全性与疗效[60]。其四, 导航式个体化治疗系统的兴起, 使激光参数(能量、密度、深度)可依据不同瘢痕类型(如滚动型、箱车型)动态调控; 部分混合激光设备甚至结合实时成像实现精准定位, 提升治疗精度。相关临床数据显示, 采用多模式点阵 CO₂ 激光(MMP)联合微针射频(FMR)治疗痤疮瘢痕的改善率显著高于传统单模式方案(42.9% vs. 16.18%)。此外, 新兴趋势还包括联合生物制剂治疗, 如 Er:YAG 激光联合 PRP 或 SVF 治疗膨胀纹较单用激光效果更佳[61]; 术后联合低能量激光(LLLT)则有助于减轻炎症、促进修复、降低红斑和 PIH 发生率[62]; 而人工智能参数优化系统正在通过 Meta 分析等大数据手段建立标准化数据库, 为未来个体化治疗方案的智能推荐提供支持。总之点阵 CO₂ 激光的多模态应用正在不断向精准化、微创化与智能化方向演进, 未来有望进一步融合实时监测、生物标志物反馈与 AI 决策辅助系统, 推动个体化皮肤治疗迈入新阶段。

5. 结语

CO₂ 点阵激光在多模态治疗体系中展现出广泛的临床应用前景, 其安全性已在多项研究中得到验证, 常见不良反应主要为轻中度、可逆性问题, 如红斑、疼痛、色素沉着或感染风险[63]。其低创伤、高患者满意度特点, 使其在瘢痕管理、外阴疾病、色素障碍等领域广受认可[64]。通过优化治疗参数(如低能量 + 高密度、使用超脉冲模式)与强化术后护理(如冷敷、rhEGF 生物敷料), 可有效减少副作用发生率, 特别是在深肤色人群中。与此同时, 联合应用光动力疗法、外用药物(如噻吗洛尔)、微针射频等策略, 不仅提升疗效, 也延长了治疗的维持时间, 真正实现了“精准、安全、协同”的临床目标[65]。

未来, CO₂ 点阵激光的研究将更加侧重于机制阐释、智能化技术集成和长期随访数据积累。一方面, 其在促进皮肤屏障修复(上调 claudin-1)与调控炎症因子(如 TGF- β 1、IL-6)方面的作用机制正在逐步揭示;

另一方面, AI 辅助能量动态调节、图像引导定位(如 OCT)等智能设备的引入, 有望提升操作安全性与治疗精度。同时, 部分国家已将该技术纳入医保支持范围, 提升了其在临床实践中的可及性与经济效益。总体而言, CO₂ 点阵激光作为多模态治疗的核心平台, 其融合性、个体化与再生能力为多个疾病领域提供了新的干预手段, 未来在组织再生与功能修复方向仍具有广阔的发展空间。

参考文献

- [1] 于铎, 白洁, 于铭, 杨静, 刘玲. 点阵铒激光与黄金微针联合胶原蛋白敷料治疗痤疮凹陷性瘢痕的疗效及安全性评价[J]. 中国美容医学, 2025, 34(2): 127-130.
- [2] Grigoryan, K.V., Fusco, I., Ronconi, L. and Zingoni, T. (2024) Fractional CO₂ Laser Therapy for Effective Treatment of Facial Traumatic Hypertrophic Scar: A Case Report. *American Journal of Case Reports*, 25, e942706. <https://doi.org/10.12659/ajcr.942706>
- [3] Shorakaie, A., Nahvifard, E., Shirkavand, A., Ataie Fashtami, L. and Mohajerani, E. (2024) CO₂ Fractional Laser Induced Skin Micro-Tunnel Thermal Damage Patterns: A Simulation Study. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 15, e63. <https://doi.org/10.34172/jlms.2024.63>
- [4] Magni, G., Pieri, L., Fusco, I., Madeddu, F., Zingoni, T. and Rossi, F. (2023) Laser Emission at 675 Nm: *In Vitro* Study Evidence of a Promising Role in Skin Rejuvenation. *Regenerative Therapy*, 22, 176-180. <https://doi.org/10.1016/j.reth.2023.01.007>
- [5] Elazhary, E., Abd Al-Salam, F., Abd El-Hafiz, H. and Maghraby, H. (2022) Fractional Carbon Dioxide (CO₂) Laser Alone versus Fractional CO₂ Laser Combined with Triamcinolone Acetonide or Trichloroacetic Acid in Keloid Treatment: A Comparative Clinical & Radiological Study. *Dermatology Practical & Conceptual*, 12, e2022072. <https://doi.org/10.5826/dpc.1202a72>
- [6] Mao, Z., Lin, B., Huang, Y. and Huang, D. (2021) Microscopic Treatment of Benign Eyelid Margin Lesions with Ultrapulse Carbon Dioxide (CO₂) Laser. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*, 23, 184-187. <https://doi.org/10.1080/14764172.2022.2048673>
- [7] Meymandi, S.S., Safari, A., Meymandi, M.S. and Aflatoonian, M. (2024) The Role of Fractional Laser-Assisted Drug Delivery in Enhancing the Efficacy of Topical Bimatoprost Solution in the Treatment of Alopecia Areata: An Inpatient Comparative Randomized Clinical Trial. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 23, 1663-1668. <https://doi.org/10.1111/jocd.16209>
- [8] 王德悦, 龚玲, 董祥林. 富血小板血浆联合点阵激光在瘢痕防治中的应用及研究进展[J]. 中国美容医学, 2024, 33(9): 189-193.
- [9] Jin, Q., Dong, R., Zhi, J., Yin, H., Nan, M., Jin, Z., et al. (2025) Evaluation of the Therapeutic Efficacy of Moist Wound Healing after Fractional CO₂ Laser Surgery. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 24, e70079. <https://doi.org/10.1111/jocd.70079>
- [10] Tang, Q., Che, Q., Xie, Y., Xie, L., Liu, L., Gao, Y., et al. (2024) Herpes Simplex Virus Reactivation after Nonablative Fractional Laser to Treat Facial Photoaging. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*, 26, 86-88. <https://doi.org/10.1080/14764172.2024.2370418>
- [11] Liu, F., Zhou, Q., Tao, M., Shu, L. and Cao, Y. (2024) Efficacy and Safety of CO₂ Fractional Laser versus Er:YAG Fractional Laser in the Treatment of Atrophic Acne Scar: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 23, 2768-2778. <https://doi.org/10.1111/jocd.16348>
- [12] 吴敏, 尹恒, 黄汉尧, 石冰, 李承浩. 二氧化碳点阵激光早期治疗一期唇裂术后瘢痕的临床疗效[J]. 口腔颌面外科杂志, 2024, 34(5): 331-335.
- [13] Waibel, J.S. and Schallen, K.P. (2025) Non-Ablative Fractional 1940-Nm Diode Laser for Skin Resurfacing and Treatment of Benign Pigmented Lesions. *Lasers in Surgery and Medicine*, 57, 63-70. <https://doi.org/10.1002/lsm.23866>
- [14] Chan, J.Y.H., Alhamam, A., Witherspoon, L., Rivers, J.K. and Flannigan, R.K. (2024) Fractional CO₂ Laser for the Treatment of Peyronie's Disease. *Canadian Urological Association Journal*, 19, 25-31. <https://doi.org/10.5489/cuaj.8852>
- [15] D'Oria, O., Giannini, A., Buzzaccarini, G., Tinelli, A., Corrado, G., Frega, A., et al. (2022) Fractional CO₂ Laser for Vulvo-Vaginal Atrophy in Gynecologic Cancer Patients: A Valid Therapeutic Choice? A Systematic Review. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 277, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2022.08.012>
- [16] 贝宏, 罗文霞, 杨万英. CO₂点阵激光联合 5%米诺地尔酊治疗雄激素性脱发的临床研究[J]. 临床医学工程, 2018, 25(8): 987-988.
- [17] 李盛, 黄茜, 陈敏. 雄激素性脱发的发病机制与激光治疗[J]. 激光生物学报, 2016, 25(2): 107-111.

- [18] Li, X., Fan, H., Wang, Y., Sun, C., Yang, X., Ma, X., *et al.* (2023) Fractional Carbon Dioxide Laser Combined with Subcision for the Treatment of Three Subtypes of Atrophic Acne Scars: A Retrospective Analysis. *Lasers in Medical Science*, **38**, Article No. 195. <https://doi.org/10.1007/s10103-023-03851-w>
- [19] Alberdi, E. and Gómez, C. (2023) Urea versus Fractional Er:YAG Laser Pretreatment of Methylene Blue Photodynamic Therapy in the Treatment of Moderate Toenail Onychomycosis: Short- and Medium-Term Effects. *Archives of Dermatological Research*, **315**, 787-794. <https://doi.org/10.1007/s00403-022-02448-7>
- [20] Zhou, J., Huang, X., Chen, M., Chen, X. and Chen, J. (2024) Clinical Efficacy of Ultrasound-Guided Chondroitin Polysulfate from Bovine Trachea Combined with Fractional CO₂ Laser in the Treatment of Scar after Burn Repair. *Advances in Dermatology and Allergology*, **41**, 314-327. <https://doi.org/10.5114/ada.2024.141110>
- [21] Luo, Q. (2023) The Combined Application of Bleomycin and Triamcinolone for the Treatment of Keloids and Hypertrophic Scars: An Effective Therapy for Treating Refractory Keloids and Hypertrophic Scars. *Skin Research and Technology*, **29**, e13389. <https://doi.org/10.1111/srt.13389>
- [22] Kim, E.Y., Wong, J.H., Hussain, A. and Khachemoune, A. (2024) Evidence-Based Management of Cutaneous Scarring in Dermatology Part 2: Atrophic Acne Scarring. *Archives of Dermatological Research*, **316**, Article No. 19. <https://doi.org/10.1007/s00403-023-02737-9>
- [23] Moravej, H., Forghanian, A., Dadkhahfar, S. and Mozafari, N. (2022) Intralesional Bleomycin versus Intralesional Triamcinolone in the Treatment of Keloids and Hypertrophic Scars. *Dermatologic Therapy*, **35**, e15730. <https://doi.org/10.1111/dth.15730>
- [24] 王莉, 李凯, 卫静宜, 等. M22-ResurFx 点阵激光治疗腹部妊娠纹疗效及安全性观察[J]. 临床皮肤科杂志, 2018, 47(8): 528-531.
- [25] Shin, J.Y., Kim, J., Choi, Y., Lee, S. and Kang, N. (2023) Escin Activates Canonical Wnt/ β -Catenin Signaling Pathway by Facilitating the Proteasomal Degradation of Glycogen Synthase Kinase-3 β in Cultured Human Dermal Papilla Cells. *Current Issues in Molecular Biology*, **45**, 5902-5913. <https://doi.org/10.3390/cimb45070373>
- [26] Mokhtari, F., Zavare, Z. and Iraj, F. (2023) Topical 5% Minoxidil versus Combined Erbium YAG Laser and Topical 5% Minoxidil in Androgenetic Alopecia: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Cosmetic Dermatology*, **22**, 2737-2743. <https://doi.org/10.1111/jocd.15955>
- [27] 王佳丽, 程丹彤, 罗娜娜, 等. 斑秃的免疫发病机制与靶向治疗进展[J]. 皮肤性病诊疗学杂志, 2023, 30(1): 83-88.
- [28] 严莹, 沈巍, 谢晓蕾, 等. CO₂ 点阵激光联合 5%米诺地尔酊治疗斑秃疗效分析[J]. 浙江临床医学, 2024, 26(8): 1185-1187.
- [29] 王梦霄, 陈志勇, 罗涵, 张光钢. 改良 CO₂ 点阵激光联合光动力对难愈性创面的疗效[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(1): 53-59.
- [30] 李晓东. 皮下剥离联合二氧化碳点阵激光治疗痤疮凹陷性瘢痕临床观察[J]. 中国中西医结合皮肤性病学杂志, 2025, 24(1): 45-47.
- [31] Abu Zeid, O., Omar, N. and El Sharkawy, D. (2020) The Efficacy of Combining Fractional CO₂ Laser and Tacrolimus Ointment in the Treatment of Vitiligo. *Journal of the Egyptian Women's Dermatologic Society*, **17**, 25-30. https://doi.org/10.4103/jewd.jewd_41_19
- [32] Wohlrab, J. (2016) Topical Preparations and Their Use in Dermatology. *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, **14**, 1061-1070. <https://doi.org/10.1111/ddg.13151>
- [33] Thu, H.T.T. and Le Huu, D. (2022) Efficacy of the Combination of Fractional Laser CO₂ and Narrowband Ultraviolet B in the Treatment of Non-Segmental Vitiligo. *Tạp chí Da liễu học Việt Nam*, **36**, 47.
- [34] Hu, Y., Qi, X., Hu, Y., Lu, Y., Liu, K., Han, X., *et al.* (2019) Effects of CO₂ Fractional Laser Therapy on Peripheral Blood Cytokines in Patients with Vitiligo. *Dermatologic Therapy*, **32**, e12992. <https://doi.org/10.1111/dth.12992>
- [35] Mohammadi, S., Amiri, R., Khalili, M., Iranmanesh, B. and Aflatoonian, M. (2021) Treatment Protocols and Efficacy of Combined Laser with Medical Treatment Modalities in Vitiligo. *Journal of Cosmetic Dermatology*, **21**, 3272-3291. <https://doi.org/10.1111/jocd.14602>
- [36] Jamal-edine, A.M., El-Barbary, R.A. and Moftah, N.H. (2021) Fractional versus Full Ablative CO₂ Laser in Recipient Site of Non-Cultured Melanocytes and Keratinocyte Transplantation in Treatment of Vitiligo. *Journal of Cosmetic Dermatology*, **21**, 1506-1513. <https://doi.org/10.1111/jocd.14324>
- [37] Nasser, M.A.E.M., Raggi El Tahlawi, S.M., Abdelfatah, Z.A. and Soltan, M.R. (2021) Stress, Anxiety, and Depression in Patients with Vitiligo. *Middle East Current Psychiatry*, **28**, Article No. 63. <https://doi.org/10.1186/s43045-021-00120-w>
- [38] Bastonini, E., Bellei, B., Filoni, A., Kovacs, D., Iacovelli, P. and Picardo, M. (2019) Involvement of Non-Melanocytic Skin Cells in Vitiligo. *Experimental Dermatology*, **28**, 667-673. <https://doi.org/10.1111/exd.13868>

- [39] 张冬云, 王晓林, 靳曰军. 308 nm 准分子激光联合 CO₂ 点阵激光治疗白癜风 45 例临床观察[J]. 中国皮肤性病学杂志, 2016, 30(11): 1132-1134.
- [40] Kołodziejczyk, K., Hop, I., Branewska, J., Ostrowska, B., Matysek, M., Olszanicka, A., *et al.* (2023) CO₂ Ablative Fractional Laser-Mechanism of Action and Assessment of Safety, Effectiveness in the Treatment and Possible Side Effects Based on a Review of Scientific Literature. *Journal of Education, Health and Sport*, **21**, 72-77. <https://doi.org/10.12775/jehs.2023.21.01.008>
- [41] Li, Y., Yao, C., Zhang, H., Li, L. and Song, Y. (2022) Efficacy and Safety of 755-Nm Picosecond Alexandrite Laser with Topical Tranexamic Acid versus Laser Monotherapy for Melasma and Facial Rejuvenation: A Multicenter, Randomized, Double-Blinded, Split-Face Study in Chinese Patients. *Lasers in Medical Science*, **37**, 2879-2887. <https://doi.org/10.1007/s10103-022-03566-4>
- [42] Lai, D., Cheng, S., Zhou, S., Hao, J., Chen, H., Jia, K., *et al.* (2024) 755-nm Picosecond Laser Plus Topical 20% Azelaic Acid Compared to Topical 20% Azelaic Acid Alone for the Treatment of Melasma: A Randomized, Split-Face and Controlled Trial. *Lasers in Medical Science*, **39**, Article No. 113. <https://doi.org/10.1007/s10103-024-04052-9>
- [43] Wu, W., Su, Q., Zhang, Y., Du, Y., Hu, Y. and Wang, F. (2024) Novel 532-Nm Q-Switched Nd:YAG Laser for the Treatment of Melasma and Rejuvenation: A Prospective, Randomized Controlled Comparison with 1064-Nm Q-Switched Nd:YAG Laser. *International Journal of Dermatology*, **63**, 1242-1251. <https://doi.org/10.1111/ijd.17091>
- [44] Coricciati, L., Gabellone, M., Donne, P.D., Pennati, B.M. and Zingoni, T. (2023) The 675-Nm Wavelength for Treating Facial Melasma. *Skin Research and Technology*, **29**, e13434. <https://doi.org/10.1111/srt.13434>
- [45] Zheng, W., Liu, S., Tian, L. and Ke, D. (2024) Roller Microneedle Combined with Tranexamic Acid Solution in Treating Melasma. *Journal of Visualized Experiments*, No. 203, e66015. <https://doi.org/10.3791/66015>
- [46] Maqsood, A., Zia, F., Shaukat, S., *et al.* (2024) Comparison of Efficacy and Safety of Fractional CO₂ Laser versus 70% Trichloroacetic Acid Peel in the Treatment of Facial Freckles and Lentigines. *Journal of Pakistan Association of Dermatologists*, **34**, 165.
- [47] 任浩, 邱湘宁, 谭怡忻, 等. 点阵 CO₂ 激光术后皮肤屏障修复的研究进展[J]. 中国美容整形外科杂志, 2024, 35(10): 595-600, 615.
- [48] Ustuner, P. (2025) Comparative Analysis of Laser Therapies for Striae Distensae: Fractional CO₂ vs Combined Q-Switch Nd:YAG. *Medical Science Monitor*, **31**, e947464. <https://doi.org/10.12659/msm.947464>
- [49] Tian, B. (2017) Treatment of Freckles Using a Fractional Nonablative 2940 nm Erb:YAG Laser in a Series of Asian Patients. *The Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology*, **10**, 28-30.
- [50] Schoenewolf, N.L., Hafner, J., Dummer, R. and Bogdan Allemann, I. (2015) Laser Treatment of Solar Lentigines on Dorsum of Hands: QS Ruby Laser versus Ablative CO₂ Fractional Laser—A Randomized Controlled Trial. *European Journal of Dermatology*, **25**, 122-126. <https://doi.org/10.1684/ejd.2014.2513>
- [51] Gao, L., Wen, W., Wang, Y., Li, Z., Dang, E., Yu, L., *et al.* (2022) Fractional Carbon Dioxide Laser Improves Vaginal Laxity via Remodeling of Vaginal Tissues in Asian Women. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article 5201. <https://doi.org/10.3390/jcm11175201>
- [52] Wang, L., Chen, L., Li, Y., Song, X., Mo, J., Ding, G., *et al.* (2025) Study on the Efficacy of Fractional CO₂ Laser Treatment for Vaginal Relaxation Syndrome Combined with Recurrent Bacterial Vaginitis. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 1445. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85661-4>
- [53] Salgado, H.C., Drumond, D.G., Pannain, G.D., de Melo e Costa, L.G., Sampaio, F.S. and Leite, I.C.G. (2023) Randomized Clinical Trial with Fractional CO₂ Laser and Clobetasol in the Treatment of Vulvar Lichen Sclerosus: A Clinic Study of Feasibility. *BMC Research Notes*, **16**, Article No. 33. <https://doi.org/10.1186/s13104-023-06300-7>
- [54] Pagan, L., Huisman, B.W., van der Wurff, M., Naafs, R.G.C., Schuren, F.H.J., Sanders, I.M.J.G., *et al.* (2023) The Vulvar Microbiome in Lichen Sclerosus and High-Grade Intraepithelial Lesions. *Frontiers in Microbiology*, **14**, Article 1264768. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1264768>
- [55] Andrade, G.B., Salguero, P.M., Fusco, I. and Galimberti, D.R. (2023) Clinical Evaluation and Experience in Treatments Performed with Fractional CO₂ Laser on Latin American Skin: An Observational Retrospective Study. *Photobiomodulation, Photomedicine, and Laser Surgery*, **41**, 343-349. <https://doi.org/10.1089/photob.2023.0015>
- [56] Fusano, M., Bencini, P.L. and Galimberti, M.G. (2022) Hybrid Fractional Laser Treatment for Photodamaged Facial Skin Rejuvenation 6 Years Following Fractional CO₂: Comparison of Clinical Outcome and Patients' Satisfaction. *Lasers in Surgery and Medicine*, **54**, 1045-1050. <https://doi.org/10.1002/lsm.23583>
- [57] Yuan, J., Lu, Y., Wu, Y., Gao, X. and Chen, H. (2022) Investigation of Optimal Energy or Density of a Fractional CO₂ Laser System in the Treatment of Stable Non-Segmental Vitiligo. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, **49**, Article 101684. <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2022.101684>
- [58] Campolmi, P., Quintarelli, L. and Fusco, I. (2023) A Multimodal Approach to Laser Treatment of Extensive

- Hypertrophic Burn Scar: A Case Report. *American Journal of Case Reports*, **24**, e939022. <https://doi.org/10.12659/ajcr.939022>
- [59] Shenhav, L.T., Shehadeh, W., Alcotzer, I. and Artzi, O. (2023) Hybrid Fractional Laser Facial Resurfacing: A Comparison between a Single Treatment at High Settings versus Multiple Treatments at Low to Moderate Settings. *Lasers in Surgery and Medicine*, **56**, 68-74. <https://doi.org/10.1002/lsm.23704>
- [60] El-Tayeb, N.M., Fattah, N.S.A.A., El-Badawy, N. and El-Samahy, M.H. (2025) The Effectiveness of Fractional Laser-Assisted Photodynamic Therapy Utilizing Methylene Blue for the Treatment of Keloids. *Archives of Dermatological Research*, **317**, Article No. 568. <https://doi.org/10.1007/s00403-025-04058-5>
- [61] Roohaninasab, M., Mahdi, Z., Zare, S., Dehghani, A., Goodarzi, A., Najari Nobari, N., et al. (2025) Evaluation and Comparison of the Efficacy and Safety of Erbium YAG Laser along with Normal Saline vs. Its Combination with Stromal Vascular Fraction (SVF) and Platelet-Rich Plasma (PRP) in the Treatment of Striae Distensae: A Double-Blind Randomized Clinical Trial. *Journal of Cosmetic Dermatology*, **24**, e16757. <https://doi.org/10.1111/jocd.16757>
- [62] 屈晓莺, 陈艳芳, 陈亮, 等. 低能量 Q 开关钕: 钇-铝-石榴石激光治疗红斑型酒糟鼻的疗效[J]. 中华医学美容美容杂志, 2013, 19(4): 302-303.
- [63] Keshk, Z.S., Salah, M.M. and Samy, N.A. (2025) Fractional Carbon Dioxide Laser Treatment of Hypertrophic Scar Clinical and Histopathological Evaluation. *Lasers in Medical Science*, **40**, Article No. 137. <https://doi.org/10.1007/s10103-025-04371-5>
- [64] Glahn, J.Z., Wang-Evers, M., Carlson, A.R., Marks, H., Karasik, D., Hilge, F., et al. (2024) Evaluation of Papain-Urea for Enzymatic Debridement of Coagulation Zones Following Ablative Fractional Laser Treatment. *Lasers in Surgery and Medicine*, **57**, 112-120. <https://doi.org/10.1002/lsm.23865>
- [65] Roohaninasab, M., Khodadad, F., Sadeghzadeh-Bazargan, A., Atefi, N., Zare, S., Jafarzadeh, A., et al. (2023) Efficacy of Fractional CO₂ Laser in Combination with Stromal Vascular Fraction (SVF) Compared with Fractional CO₂ Laser Alone in the Treatment of Burn Scars: A Randomized Controlled Clinical Trial. *Stem Cell Research & Therapy*, **14**, Article No. 269. <https://doi.org/10.1186/s13287-023-03480-8>