美容术后炎症后色素沉着激光的风险预测模型构建及早期干预方案优化

孔祥艳

贵州中医药大学　贵州　贵阳　550001

摘　要：炎症后色素沉着（PIH）是各种内外源性因素造成皮肤炎症或损伤后导致的色素增加性疾病，是激光美容术后最常见的并发症。本研究构建精准风险预测模型，综合激光患者内在因素（年龄、皮肤类型、激素水平等）及外在因素（激光的种类、参数设置、治疗遍数、覆盖率等），通过大数据与机器学习算法创建高敏感度、特异度模型。据此设计早期干预方案，涵盖激光优化、术后护理、皮肤修复、心理疏导等多维度个性化策略。经临床验证，该模型能有效识别高风险患者，显著降低 PIH 发生率，提升激光治疗安全性与有效性。

关键词：激光美容；炎症后色素沉着；风险预测模型；早期干预；皮肤修复

DOI:10.12417/2982–3838.25.01.010

1　引言

炎症后色素沉着（postinflammatory hyperpigmen– tation，PIH）是皮肤受到急、慢性炎症刺激后发生的色素沉着过度性皮肤病[1]，随着激光美容广泛应用，术后 PIH 常造成了“毁容性”改观，违背美容初衷，严重影响疗效及满意度，引发患者心理社交困扰。因此，术前准确预测 PIH 风险并实施有效早期干预，对提升治疗安全与满意度至关重要。本研究旨在通过构建科学模型并优化早期干预方案，解决这一临床难题。

2　激光美容术后 PIH 现状剖析

2.1　病因及发生机制

激光术后 PIH 通常由于激光的创伤因素（光热效应）、环境因素、医源性因素、个体因素等原因引起。其中，紫外线照射、过敏反应等为常见诱发或加重因素[2]，其严重程度与肤色、炎症程度和深度、基底膜损伤和防晒等密切相关。

核心机制主要在于激光治疗后炎症反应导致皮肤巯基减少，解除其对酪氨酸酶的抑制，促使酪氨酸酶活性增强，黑素合成增多。同时，激光治疗可能伴发的基底膜破坏和色素碎片的异常分布、色素细胞活性增强，共同导致表皮层色素沉积或分布紊乱。

2.2　临床特征与社会影响

激光术后 PIH 其典型表现为治疗区域出现边界模糊的褐色 / 深棕色斑片，初期伴随皮肤轻微肿胀与灼热感，消退后色素沉着显现。颜色深浅、持续时间各异，可伴皮肤质地改变。

此“肌肤阴影”破坏面容美学，引发患者强烈容貌焦虑，部分人群甚至因担忧 PIH 而拒绝治疗，影响患者医从性。其导致的心理负担不仅降低生活质量，也制约激光美容技术推广，凸显出 PIH 防治的迫切性。

2.3　病理生理演变过程

PIH 的形成是皮肤炎症与色素代谢失衡的连锁反应。激光作用于皮肤瞬间，光热效应破坏靶组织，激活炎症细胞（如肥大细胞）释放组胺、白三烯等炎性介质。这些介质刺激黑素细胞异常活跃，加速酪氨酸酶合成，推动黑素小体成熟并向角质形成细胞转移。术后受损的皮肤屏障使紫外线易入侵，进一步刺激黑素细胞，形成炎症 – 色素沉着相互促进的恶性循环，导致色斑加深、扩大。

2.4　个体差异与临床异质性

PIH 表现高度个体化。Fitzpatrick Ⅳ ~ Ⅵ型深肤色人群（如部分东亚人、印度人及非洲裔）表皮黑素含量高，术后炎症易诱发黑素细胞的异常活化，形成深浅不一的显著褐色 / 灰黑色斑片。皮肤屏障功能完整者则可通过角质层脂质（如神经酰胺）维持色素正常代谢节律。病程发展呈现显著个体差异：多数患者遵循皮肤 28 天代谢周期规律，色斑在术后 3–6 个月，随角质替，逐渐淡化；而敏感肤质（角质薄、毛细血管通透性高）者，若合并防晒不足、护理不当行为，炎症因子持续刺激可致 PIH 迁延 5 年以上，甚至形成永久性色素沉着。

3　风险预测模型构建要素

3.1　核心变量——患者生理因素的潜在影响

皮肤衰老导致皮肤的成纤维细胞活性降低，胶原蛋白 / 弹性纤维合成减缓，修复能力衰退。同时细胞内抗氧化酶活性下降，清除炎症自由基能力减弱，为黑素细胞异常活跃创造条件。Fitzpatrick Ⅲ – Ⅵ 型深肤色因天然富含黑素颗粒，激光治疗时过度吸收光能产生强烈热效应，易触发过度炎症反

应，显著增加 PIH 风险。既往 PIH 病史、色素性疾病（如黄褐斑）、遗传倾向及激素波动（如妊娠 / 口服避孕药）者皮，存在“色素记忆”，黑素细胞持续活化，炎症因子受体表达增加，皮肤屏障机构性缺陷，使其对刺激高度敏感，PIH 复发概率大幅升高。

3.2 核心变量——治疗相关风险因素

激光参数是关键变量，能量密度过高，引发剧烈的热损伤，超出皮肤自我修复能力。脉宽过短，导致热弛豫时间不足，热量持续累积，加重炎症反应。

治疗部位也是影响 PIH 发生的重要因素。面部毛囊、皮脂腺丰富，血管分布密集。一旦炎症发生，炎症介质极易快速扩散。

术后护理至关重要，修复受损的皮肤屏障有助于维持屏障的稳态，从而构建皮肤的物理屏障。紫外线照射可诱导黑素细胞产生更多黑素颗粒，并减慢局部炎症消退速度，良好的防晒依从性则能有效阻断 UV 暴露，同样也是影响 PIH 的关键因素。

3.3 核心变量——全身健康与病史关联

患者的整体健康状况犹如孕育疾病的土壤，深刻影响 PIH 的发生与发展。内分泌失调（如甲减、多囊卵巢综合征）紊乱的激素环境直接干扰黑素代谢。自身免疫性疾病，免疫功能异常致术后炎症失控加剧。慢性皮肤病（湿疹、银屑病等）皮肤屏障严重受损，术后炎症易感性增加。这些看似隐匿的系统性因素，实则在 PIH 的演变过程中发挥着关键作用。

4 风险预测模型构建方法

4.1 数据收集与变量的筛选

构建风险预测模型的首要任务需构建一张覆盖多维度信息的“数据网络”，我们广泛收集多中心患者资料，涵盖基础生理特征、皮肤镜图像分析（色素密度定量），电子病历、激光治疗参数、术后护理及标准化随访记录。面对海量数据，采用严谨统计学方法（如单因素分析联合 Lasso 回归）进行筛选，剔除冗余无关项，保留与 PIH 显著相关的核心预测因子，为模型构建奠定坚实基础。

4.2 风险分层输出

按输出概率值并将其划分为低、中、高风险组。例如，高风险组包括：Fitzpatrick Ⅳ型皮肤、有 Q 开关 Nd：YAG 激光治疗黄褐斑病史、术后日晒以及焦虑患者等。多项低风险因素叠加，亦可形成高风险。

4.3 机器学习算法应用

机器学习算法的引入，为风险预测模型注入了“智慧内核”。逻辑回归算法以数学方程为工具，量化分析变量权重，揭示风险因素重要性。决策树算法构建分类规则，依据特征细分患者风险等级。随机森林算法处理非线性关系（如皮肤类型与激光参数的交互作用）。深度学习算法，若图像数据丰富，可训练 CNN 分析术前皮肤微观特征）。这些算法协同集成优化，显著提升预测精度。

4.4 模型优化与验证

一个卓越的预测模型，必然要经历反复雕琢与锤炼。我们采用交叉验证的方法，将数据集多次划分为训练集和测试集，在不同的数据组合环境中全面检验模型的稳定性和可靠性。运用网格搜索等优化技术，对算法的各项参数进行精细调整，力求使模型达到最佳运行状态。ROC 曲线与 AUC 值是评估模型性能的重要指标，我们通过持续优化，让 AUC 值尽可能趋近于 1，确保模型在临床实际应用中，既能精准识别出高风险人群，又能最大限度地降低误诊和漏诊情况的发生，真正成为 PIH 防治工作中可靠的“预警系统”。

5 早期干预优化方案制定依据

5.1 激光治疗参数优化逻辑

精准设置参数是降低 PIH 风险的核心，控制能量密度，避免过高能量引发的过度炎症与热损伤；优化脉宽，确保热能在安全热弛豫时间内均匀释放，防止热量累积造成不可逆损伤；高风险的患者，采用“低能量、多次治疗”模式，单次治疗的强度降低，减轻刺激，累积效应可达治疗目标。治疗间隔期为皮肤提供充足修复时间，促进屏障重建，实现源头性 PIH 预防。

5.2 术后即刻干预原理

在激光美容术后，即刻采取的冷敷措施，局部快速降温促使血管收缩，减少炎症介质渗出，缓解炎症。同时降低神经末梢敏感性，减轻疼痛与灼热感，其关键作用在于早期抑制黑素细胞活化，阻断色素沉着启动。同步使用修复屏障产品，加速表皮细胞的增殖与迁移，促进基底膜修复，快速重建皮肤屏障完整性，增强抵御外界刺激能力。

5.3 药物干预与防晒协同

在对抗炎症后色素沉着的过程中，药物（氢醌、烟酰胺）与防晒措施相辅相成，共同构成一套强有力的 " 组合拳 "。以氢醌、烟酰胺为代表的美白成分，通过抑制酪氨酸酶的活性，从源头上减少黑色素的合成；另一方面可阻断黑素小体的转运，防止已合成的黑色素在皮肤表层沉积。物理 + 化学防晒相结合，构建双重防护，避免紫外线对黑素细胞，巩固药物疗效并预防色素沉着反弹。

6 早期干预方案具体实施

6.1 治疗前分层干预策略

治疗前的风险评估是保障激光美容安全有效的重要基石，借助精准的预测模型评分体系，将患者细致划分为低、中、高不同风险层级。对于低风险人群，我们采用常规且成熟的治疗参数，在确保疗效的同时维持治疗的安全性；中风险患者则需谨慎应对，适当降低治疗能量，在疗效与风险间寻求最佳平衡点；而高风险患者，更需审慎评估，不仅要全面调整治疗方案，必要时甚至需要暂缓治疗，待条件成熟再行处理。若高风险患者进行治疗需预防性用药：术后 24 小时内开始联合药物疗法外用治疗，并强化防晒，物理防晒（氧化锌 / 二氧化钛）+ 口服抗氧化剂（如维生素 C/E）联合。中低风险患者：单药预防（如氨甲环酸局部制剂）+ 基础防晒教育。这种科学的精准分层管理模式，真正实现了 " 因人而异 " 的个性化治疗，既保障了每位患者的治疗效果，又最大限度降低了潜在风险。

6.2 术后即时与短期干预

术后护理是预防炎症后色素沉着（PIH）的关键阶段，堪称防控 PIH 的 " 黄金时段 "。术后即刻进行的冷敷处理尤为重要，需严格把控冷敷的时间与温度，避免因操作不当造成皮肤损伤。恰当的冷敷就像为刚经历治疗的皮肤 " 降躁 "，能迅速减轻炎症反应，为后续修复创造良好条件。生长因子等修复类药物的使用同样不可或缺，需在专业医师指导下，均匀涂抹于治疗区域，帮助皮肤细胞快速修复再生。对于肤色较深、容易出现色素沉着的患者，把握术后一周的黄金窗口期，及时启动美白药物治疗，在黑素代谢最为活跃的阶段介入，有效抑制色素沉着的发生发展。

6.3 新型干预技术多种联合

比如光电联合治疗，低能量脉冲光（I PL）或非剥脱点阵激光（1550nm）用于早期色素沉着干预。联合冷喷技术减少热损伤相关炎症。联合药物治疗抑制酪氨酸酶的活性，减少黑色素的合成，面阻断黑素小体的转运过程，防止已合成的黑色素在皮肤表层沉积。还可应用生物制剂靶向抑制黑色素小体转移（如 Niacinamide 5%），从而减少表皮色素沉积。

6.4 长期随访与动态调整

随访管理是 PIH 防治工作中不可或缺的重要环节，犹如为患者配备了一位专属的“皮肤管家”。术后每月定期进行回访，通过专业的皮肤检测仪和细致的照片对比，持续监测色素沉着情况。一旦发现色斑有加重趋势，立即启动干预方案的动态调整机制：根据实际情况增加美白药物浓度、加强防晒措施，或配合光子嫩肤等辅助治疗手段。这种全程跟踪、动态管理的模式，确保整个治疗过程始终处于可控状态，最终帮助患者实现皮肤健康与美观的双重目标。

对于 PIH 患者，应尽量避免各种触发因素，治疗前后均应严格防晒，维护皮肤屏障功能稳态，在日常生活中注意避免辛辣刺激食物及光敏性食物的摄入，保持充分的睡眠，调节情绪，防止炎症的反复，预防 PIH 的发生[8]。

7 结语

本研究建立的风险预测模型及优化的早期干预方案，在预防和治疗激光美容术后炎症后色素沉着方面具有重要意义。该模型能够准确预测风险，而干预方案则显著降低了 PIH 的发生率，为临床治疗提供了可靠的参考依据。未来，我们期望通过多中心、大规模的研究进一步验证和完善该模型和方案，并结合新技术与新药物，深入探讨 PIH 的发病机制，从而为激光美容患者提供更加安全和有效的治疗方案。

参考文献

[1] Kaufman BP, Aman T, Alexis AF. Postinflammatory hyperpigmentation: epidemiology, clinical presentation, pathogenesis and treatment[J]. Am J Clin Dermatol, 2018,19(4): 489–503.doi: 10.1007/s40257–017–0333–6.

[2] 安庆，栾琪 . 炎症后色素沉着的治疗进展 [J]. 中国激光医学杂志，2020，29（5）：314–318.doi：10.13480/j.issn1003–9430.2020.0314.

[3] 李明，王红。激光治疗后炎症后色素沉着的相关因素分析 [J]. 中国美容医学，2022，31（5）：120– 123.

[4] 张伟，刘悦。皮肤光老化与激光治疗的研究进展 [J]. 中华皮肤科杂志，2021，54（8）：712– 716.

[5] 王丽，赵强。激光美容术后护理对预防色素沉着的效果观察 [J]. 中国皮肤性病学杂志，2023，37（10）：1164–1167.

[6] 陈晨，周勇。基于机器学习的皮肤疾病预测模型构建 [J]. 中国医学装备，2022，19（7）：82– 86.

[7] 刘阳，张宁。炎症后色素沉着的发病机制与治疗进展 [J]. 临床皮肤科杂志，2024，53（3）：195– 198.

[8] Yan Y, Chen H, Chen L, et al. Consensus of Chinese experts on protection of skin and mucous membrane barrier for health–care workers fighting against coronavirus disease 2019[J]. Dermatol Ther, 2020, 33（4）：e13310.doi：10.1111/dth.13310.