专论与综述

近红外光热疗法协同微针治疗皮肤病的研究进展

任贞妮[1,2]，赵 锋[3]，孙荣军[3]，向 柏[3*]，张国强[2*]

（1. 河北工程大学临床医学院，河北邯郸 056009；2. 河北医科大学第一医院皮肤科，河北石家庄 050032；
3. 河北医科大学药学院，药剂学教研室，河北石家庄 050017）

摘要：光热疗法作为一种新兴的非侵入性治疗方法，凭借高效性、选择性和可控性，在皮肤病治疗中展现出显著优势。然而，光照范围的局限性限制了其在临床上的广泛应用。近年来，微针技术与光热疗法的结合，不仅有效突破了药物的渗透屏障，还能在光热刺激下实现精准递药与可控释放，显著提高治疗效果并减轻不良反应。该文系统评述了近红外光热疗法与微针技术协同应用，治疗银屑病、黑色素瘤、特应性皮炎、皮肤损伤等皮肤病的研究进展，分析了该方案在微针载药能力、光热材料生物相容性及安全性评估等方面面临的关键挑战，并展望了其在精准医学和个体化治疗中的未来发展方向。

关键词：光热疗法；微针；皮肤病；协同治疗；精准医学；个体化治疗；研究进展

中图分类号：R944.9；R986　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-8255(2026)06-0625-09

引用：任贞妮, 赵 锋, 孙荣军, 等. 近红外光热疗法协同微针治疗皮肤病的研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2026, **57**(6): 625-633. DOI：10.16522/j.cnki.cjph.2026.06.001

Research Progress on Near-infrared Photothermal Therapy Combined with Microneedles for the Treatment of Skin Diseases

REN Zhenni[1,2], ZHAO Feng[3], SUN Rongjun[3], XIANG Bai[3*], ZHANG Guoqiang[2*]

(*1. College of Clinical Medicine, Hebei University of Engineering, Handan 056009; 2. Dept. of Dermatology, the First Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050032; 3. Dept. of Pharmaceutics, College of Pharmacy, Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017*)

ABSTRACT: Photothermal therapy, as an emerging non-invasive treatment modality, demonstrates significant advantages in the treatment of skin diseases due to its high efficacy, selectivity, and controllability. However, the limited range of light irradiation restricts its broad clinical application. In recent years, the combination of microneedle technology with photothermal therapy has not only effectively overcome the skin drug penetration barrier but also enabled precise drug delivery and controlled-release under photothermal stimulation, significantly improving therapeutic outcomes and reducing adverse effects. This review systematically evaluates the research progress on the synergistic application of near-infrared photothermal therapy and microneedle technology in the treatment of psoriasis, melanoma, atopic dermatitis and skin wounds. It analyzes the key challenges of this combination therapy in terms of drug loading capacity, biocompatibility of photothermal materials, and safety assessment, and looks forward to future directions for its development in precision medicine and personalized treatment.

Key Words: photothermal therapy; microneedle; skin disease; synergistic therapy; precision medicine; personalized treatment; research progress

近年来，随着纳米技术和集成光学技术的快速发展，光热疗法（photothermal therapy，PTT）作为一种新兴的非侵入性治疗手段，在肿瘤、感染及皮肤病等治疗领域展现出巨大的应用潜力。PTT 主要依赖光热转化剂（photothermal agent，PTA）在近红外光（near-infrared，NIR）照射下将光能转化为局部热能，从而使靶标（如肿瘤、病原体）发生不可逆损伤[1]。PTT 还具有高选择性、高时空可控性、低毒性等优势[2-3]，已被广泛用于实体瘤（如黑色素瘤、乳腺癌）的治疗[4-6]。有研究[7-9]显示，一些高效 PTA［如黑磷、二维过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物（transition metal carbides/nitrides/carbonitride，MXene）］在黑色素瘤模型中表现出显著的抑瘤作用，以及较低的系统毒性和不良反应。

皮肤病作为全球第四大非致死性慢性疾病，发病率近年来持续上升[10]。这与环境污染（如空气颗粒物暴露、紫外辐射）及社会心理压力增加等因素密切相关。常见皮肤病如银屑病（psoriasis，PsO）、特应性皮炎（atopic dermatitis，AD）和寻常痤疮（acne vulgaris，AV）[11]等，患病率和复发率高，患者社会心理负担重，已对全球公共卫生构成沉重负担。全球约有 1.25 亿 PsO 患者，占总人口 2%～3%，其中美国的成人患病率为 3.0%，患者约 750 万[12-13]；2021 年的流行病学研究[14]显示，中国的 PsO 患者约为 845 万，相应的年龄标准化患病率为每 10 万人约 474 例。尽管我国的 PsO 患病率低于欧美国家，但由于人口基数庞大，且发病率呈上升趋势，也使得公共卫生负担日益加重。AD 的全球流行水平相对稳定，患病率约为 2.6%[15]。相比之下，AV 在青少年及年轻人中的患病率高达 75%～90%[16]，且其发病率因地区与人群差异而呈现明显波动特性。这些皮肤病通常都具有病灶表浅、局限性强、易复发的特征，且患者依从性较差，因此尤其适合采用局部光热干预策略进行治疗。已有研究[17-18]表明，PTT 不仅可通过局部升温来杀灭细菌、真菌和异常角质形成细胞，还能调节局部免疫微环境，从而缓解炎症反应，为浅表皮肤病的治疗提供了新思路。然而，单一 PTT 模式存在一定局限性。由于 NIR 的穿透深度有限，热效应分布不均且持续性不足，可能导致皮肤深部治疗不完全[19]，甚至引发灼伤、色素沉着等不良反应[20]。为克服单一 PTT 模式的不足，研究者探索了 PTT 与多种药物递送系统联合应用的方案[21-22]。微针（microneedle，MN）作为一种新型微创透皮给药方式，能机械性穿透角质层，帮助药物直达真皮层，从而显著增加药物的局部沉积量和生物利用度，并改善患者依从性[23-24]。不仅如此，采用可溶性或刺激响应性材料构建的 MN[25-27]，可实现光热效应与药物治疗的时空协同作用[28-29]。这种协同模式不仅增强了 PTT 的渗透深度与作用持续性，还显著降低了系统性暴露与组织热损伤的风险。此外，MN 良好的生物相容性不仅为临床转化奠定了基础，也为慢性复发性皮肤病的个体化治疗提供了新的研究方向。综上所述，PTT 与 MN 的协同应用构建了一种精准、可控且安全的多模态治疗平台，既保留了 PTT 的高选择性，又具备靶向递药与控释功能，能克服单一疗法的局限性，在常见皮肤病乃至皮肤肿瘤等的局部治疗中具有广阔的临床转化前景。本研究综述了 NIR-PTT 协同 MN 透皮给药技术在常见皮肤病治疗中的研究进展，并按照疾病类别分别阐述，旨在为皮肤病的精准化、个性化临床治疗提供新思路和参考。

1　在 PsO 治疗中的研究进展

PsO 是一种典型的免疫介导的慢性炎症性疾病（immune-mediated chronic inflammatory disease，IMCID）[30-32]，以皮肤病理改变为特征，表现为病变部位的角质形成细胞过度增殖和炎症细胞浸润到表皮，导致皮肤出现进行性增厚、红斑和鳞屑[33]。治疗 PsO 的常用药物包括糖皮质激素、免疫抑制剂、钙调神经磷酸酶抑制剂及维生素 D 类似物等。此类药物长期使用易引发肝肾毒性、高血压、皮肤萎缩等不良反应[34]。此外，病变区域角质层的异常增生，

收稿日期：2025-12-16

作者简介：任贞妮，硕士研究生，专业方向：皮肤病的临床和基础研究。

通信作者：张国强，教授，从事黑色素瘤、银屑病等皮肤病的临床和基础研究。

向柏，教授，从事新型纳米药物递送系统的研究。

严重阻碍了药物有效渗透，因而传统治疗方案常面临疗效欠佳的问题[35]。而 NIR-PTT 协同 MN 透皮给药技术不仅可穿透角质层高效递送药物，还可借助 NIR 激活光热效应，实现低剂量下的高效靶向治疗，显著降低了系统性不良反应风险，是一种更安全、有效的 PsO 治疗新路径。

WU 等[17]制备了一种以透明质酸（hyaluronic acid，HA）为基质的可溶性 MN，同时负载 IL-17 单克隆抗体（monoclonal antibodies，mAbs）和 MXene。HA-MN 能有效穿透角质层并快速溶解，减少基质残留风险；MXene 在 808 nm NIR 照射下可迅速将光能转化为热能，进一步促使 MN 快速溶解并释放药物，实现高效透皮给药。PsO 模型小鼠体内试验结果显示，经该组合治疗后，小鼠的银屑病面积与严重程度指数（psoriasis area and severity index，PASI）显著小于传统皮下注射治疗组，提示该方案的治疗效果优异。XIA 等[36]将黄芩苷封装于具有光热性能的腐植酸 - 稀土纳米粒（humic acid-europium based nanoparticles，HEuB NPs）中，并采用 HA-MN 贴片帮助该纳米粒的递送。HEuB NPs 可在近红外二区（near-infrared Ⅱ，NIR-Ⅱ）光照射下将光能转化为热能，响应性地释放黄芩苷，从而增强自由基清除能力、减轻炎症反应。LU 等[37]开发了一种载黑磷的反蛋白石结构水凝胶 MN。该结构具备纳米孔道，有助于药物的负载与响应性释放；黑磷能在 NIR 照射下诱导水凝胶结构塌陷，实现药物快速释放。体外皮肤渗透试验表明，该系统在 NIR 照射下的药物释放率超过 50%，远高于室温时的 10%。小鼠体内试验结果表明，该系统在光照辅助下的治疗效果与传统软膏相当，显示出良好的临床转化前景。上述 3 种光热响应性 MN 在 PsO 研究中均表现出良好的药物释放和治疗效果，为 PTT-MN 联合治疗 PsO 开辟了新的研究方向。

2 在黑色素瘤治疗中的研究进展

黑色素瘤是一种侵袭性和恶性程度很高的皮肤癌[38-39]。据预测[40]，到 2040 年，黑色素瘤的发病率将增加 50%，死亡率将上升 68%，凸显了开发更有效治疗策略的紧迫性。尽管手术切除是治疗黑色素瘤的主要方式，但其针对眼睑、鼻腔、黏膜或指甲等特殊部位的病灶，存在显著的应用局限性[41-42]。NIR-PTT 协同 MN 的方案，为黑色素瘤尤其是难治型病例提供了更安全、高效的治疗新策略。

ZHAO 等[43]设计了一种 pH 与光热双重响应性智能 MN。先将硫化铜与喜树碱（camptothecin，CPT）共封装于沸石咪唑酯骨架 -8（zeolitic imidazolate framework-8，ZIF-8）中，再通过多步离心铸造法制成可溶性 MN。体外释放试验结果显示，ZIF-8 可在酸性条件（pH 5.0）下发生结构解体，使 CPT 的 12 h 累积释放率达到 65%（约为中性环境的 5 倍）；经 808 nm 激光照射，可进一步加速药物释放，实现 pH 值与光热双重响应、协同控释。该体系在 B16 黑色素瘤模型小鼠中表现出显著的肿瘤抑制效果，且小鼠体质量稳定，主要脏器未见损伤，而皮肤穿刺位点在 7 ～ 10 d 可完全愈合。

LI 等[44]构建了一种 NIR 与磁双重响应性智能 MN。先将达卡巴嗪（dacarbazine，DTIC）和吲哚菁绿（indocyanine green，ICG）共载于磁性氧化铁@TpBD 共价有机框架（iron oxide@TpBD covalent organic framework，Fe_3O_4@TpBD COF）纳米颗粒中，然后将之装载至以白及多糖（*Bletilla striata* polysaccharide，BSP）与 HA 为针尖基质的 MN 中。该纳米颗粒利用 Fe_3O_4 的磁响应性与 COF 的多孔结构实现了药物高负载与外场可控释放；在 808 nm NIR 照射下可触发光热效应，并同步释放药物，实现化药与光热的协同抗肿瘤作用。小鼠体内药动学试验结果表明，该系统可有效抑制肿瘤生长，且在治疗过程中耐受性良好、安全性较高。WANG 等[45]进一步开发了具备自监测与光控释药功能的 MN；此外，将 ICG 与多柔比星（doxorubicin，DOX）封装于具有聚集诱导发光（aggregation-induced emission，AIE）特性的聚合物纳米颗粒中。该系统利用 AIE 材料在 NIR 照射下的可逆聚集 - 解聚特性，实现了光热升温、药物释放和荧光监测的动态耦合，成功构建了治疗与监测一体化体系。小鼠体内试验结果显示，采用该 MN 系统治疗的小鼠经 2 轮光照后肿瘤抑制率高达 97%，同时皮肤穿刺区愈合状况良

好，未见光致损伤，验证了其良好的生物相容性与重复照射耐受性。针对黑色素瘤的血管生成依赖特征，YE 等[46]设计了一种兼具光热消融与抗血管生成功能的可溶性 MN。该研究以岩藻多糖（fucoidan，FUC）为活性成分，结合高光热效能的碲纳米颗粒（tellurium nanoparticles，Te NPs）构建复合体系；针体由 2- 乙基 -2- 噁唑啉聚合物（the copolymer of 2-ethyl-2-oxazoline，PEtOx）与硫酸软骨素组成，并采用聚己内酯（polycaprolactone，PCL）为背衬，增强了力学性能。FUC 可显著抑制血管生成，配合光热作用，实现双机制联合抗肿瘤效果。小鼠体内抗肿瘤试验结果表明，该系统可有效减小肿瘤体积、降低血管密度，治疗后仅出现轻微局部反应，系统耐受性良好。

上述研究通过 MOF、COF、AIE 及生物多糖 - 纳米复合材料等多种材料创新，结合磁 - 光双重响应、可视释药与光热 - 抗血管生成协同机制等设计策略，显著提升了黑色素瘤局部治疗的效率与安全性。多项动物试验结果表明，这类可溶性 MN 在实现高效抑瘤的同时，具备良好皮肤耐受性，但未来仍需进一步开展皮肤刺激性、热安全阈值与长期代谢等标准化验证研究，为其临床应用奠定基础。

3　在 AD 治疗中的研究进展

AD 是一种全球范围内高发的非致命疾病[47]，临床表现为皮肤干燥、剧烈瘙痒及反复发作的湿疹性皮损[48]。目前，AD 的临床治疗主要采用系统性免疫抑制剂和外用糖皮质激素等药物，旨在调节免疫反应或缓解症状[49-50]。然而，这些传统方案常因药物在非靶器官中的广泛分布而带来多种不良反应，如免疫抑制、皮肤萎缩、高血糖等，且需频繁用药，导致患者依从性下降。因此，开发一种兼具靶向性、安全性与高效性的替代治疗策略迫在眉睫。

SONG 等[51]制备了一种多功能 NIR 响应性 MN 贴片，用以负载曲安奈德（triamcinolone acetonide，TA）及黑磷量子点（black phosphorus quantum dot，BPQD）。该系统以 HA 为背衬材料，兼具保湿与递药双重作用，针尖则采用低熔点琼脂糖与 PVP 的复合材料，获得了优异的机械性能。力学测试结果显示，单个微针的断裂力约为 0.46 N，可顺利穿透角质层而不折断。在 808 nm NIR 照射下，BPQD 能迅速将光能转化为局部热能，引发材料相变并触发 TA 的热控释放，从而精准作用于病灶区域，有效缓解炎症与皮肤干燥症状。此外，鉴于 AD 的发病机制与氧化应激密切相关[52-53]，ZHANG 等[27]设计了一种集成聚多巴胺（polydopamine，PDA）纳米酶的光响应性可溶性 MN。该体系以甲基丙烯酰化透明质酸（methacrylated hyaluronic acid，HAMA）为针尖基质并载入 PDA 纳米酶，同时以 HA 作为背衬材料，用于保湿和修复皮肤屏障。该体系兼具优异的光热与抗氧化特性，在光照下可改善皮肤微循环、抑制细菌生长并清除活性氧，从而缓解炎症反应。体内试验结果显示，AD 模型小鼠经该 MN 体系结合 NIR 光照治疗 5 周后，炎症评分显著降低，表皮厚度减小，肥大细胞浸润情况显著改善，活性氧与免疫球蛋白 E 的水平均明显降低，且主要脏器未观察到明显异常。基于“PPT+ 抗氧化”双重作用机制，该方案不仅能有效改善皮肤损伤，还展现出良好的安全性与长期耐受性。综上所述，合理的材料选择与结构设计可显著增强 MN 的治疗效果，为 AD 等炎症性皮肤病的治疗提供新思路。

需要强调的是，AD 病因复杂，涉及遗传、免疫、环境和屏障功能等多重因素，单一疗法难以根治。因此，基于多重机制联合干预的治疗策略具有重要应用价值。研究[54]表明，在常规治疗无效或中重度患者中，PPT 已被视为一种有效的辅助方法。将光热效应与 MN 定向递药融合，不仅提高了治疗效率，还为实现精准、个体化的 AD 治疗提供了新思路。

4　在皮肤损伤治疗中的研究进展

细菌感染是急性和慢性伤口愈合的主要障碍之一。据统计[55]，60％～ 80％的慢性创面问题均与细菌生物膜的形成密切相关。抗菌药是清除创面微生物生物膜的主要治疗手段，但易诱发细菌耐药性，存在疗效有限且常伴有系统性不良反应等问题，已难以满足复杂感染创面的治疗需求。相比之下，MN 技术凭借出色的穿透能力，可突破角质层与细菌生物膜屏障，将抗菌药高效、精准地递送至深层感染

组织。同时，结合 NIR-PTT 产生的局部温升效应，不仅能增强药物的扩散与释放速率，还可直接抑制病原体活性，为感染性皮肤损伤提供高效且可控的治疗新策略。

SU 等[56]开发了一种多功能光响应性 MN 贴片，用于按需释放抗菌肽 W379（antimicrobial peptide W379，AMP-W379）以清除生物膜。该系统利用光热剂 IR780 与相变材料 1- 十四醇（tetradecanol，TD）构建针体框架。IR780 在 808 nm NIR 照射下将光能转化为热能，使 TD 熔融，从而实现 AMP-W379 的光热触发释放。该设计兼具光控、相变及缓释特性，能精准作用于感染区域并显著提升抗菌效率。体内外试验结果表明，该 MN 体系具有良好的机械稳定性与组织相容性，且在抑制生物膜形成与促进创面闭合等方面表现突出。为实现更深层组织的联合修复，ZHENG 等[57]提出将 MN 与壳聚糖（chitosan，CS）凝胶协同使用的策略，设计了 MgO@PDA 复合 MN。该 MN 体系具有光热响应特性，载药量高，可在 NIR 照射下于创面微酸性环境中持续释放 Mg^{2+}，并与 CS 凝胶的保湿、促愈功能形成协同效应，加速血管生成与组织重塑。基于金黄色葡萄球菌感染 SD 大鼠全层皮肤创伤模型的试验结果显示，给药 14 d 后，联合治疗组大鼠的创面几乎完全愈合，新生血管密度显著提高，且未观察到明显红斑、炎症反应或脏器异常。JIN 等[58]建立了以 3 种功能性金属（Au、Zn^{2+}、$Ce^{3+/4+}$，简称 AZC）纳米颗粒为核心的可溶性 MN，并用于负载万古霉素，以实现光热、抗菌和抗炎三重协同效应。该 MN 体系在 NIR 照射下表现出强效的抗菌与抗炎活性。在耐甲氧西林金黄色葡萄球菌感染的 SD 大鼠脓肿模型中，该 MN 体系能显著抑制细菌生长，减轻炎症反应并加速创面闭合，且具有良好的系统安全性。该研究表明，将不同的金属离子协同配伍设计，能同时发挥抗菌、抗氧化及促愈作用，为解决耐药性细菌感染问题提供了新思路。值得强调的是，MN 疗法在伤口管理中具有无痛、简便、成本低等优势，能精准递药、减少给药频率，从而显著提高患者依从性。同时，多数 PTA 本身具备止血、抗氧化与促进细胞黏附等多重功能[56-61]，可进一步加速创面修复。因此，将 MN 递药系统与 NIR-PTT 相结合构建一体化治疗平台，有望为感染性皮肤损伤，尤其是顽固性生物膜相关创伤，提供高效、安全、可控的新型治疗路径。

5 总结与展望

NIR-PTT 协同 MN 透皮递药技术，凭借“热效应 + 精准递药”的双重优势，构建了一种高效、微创的治疗平台，为皮肤病治疗提供了新策略。该策略基于局部沉积与光热可控释放特性，兼顾了治疗的靶向性与安全性，且在动物试验中表现出良好的局部耐受性和组织相容性，显著降低了系统性不良反应的发生风险。

如表 1 所示，该策略在 PsO、黑色素瘤、AD、皮肤损伤等疾病中均表现出优于单一疗法的治疗效果，充分体现出“1+1>2”的增强效应。尽管如此，该领域仍存在若干亟待突破的技术瓶颈。首先，载药量受限与剂量一致性差仍是 MN 实现临床转化的关键制约因素。近年来的系统性综述已将其列为该技术当前的主要局限之一，指出 MN 普遍存在药物负载能力低、剂量重复性差、难以达到有效治疗浓度等问题[62]。在大分子或抗体药物的给药场景中，有研究[63]以“假设载药率为 10%”为例进行了量级估算，结果显示单贴 MN 理论上可递送的抗体药物剂量约为 22.4 mg，显著低于系统给药的常用剂量（200 ～ 400 mg）。这说明经皮给药剂量与系统给药之间存在数量级差距，提示后续需通过优化材料与载药系统架构设计（如多层结构、针尖富集或核 - 壳布局等）提升可达剂量与给药效率，以进一步提高 MN 在中 / 大分子药物治疗中的应用潜力。其次，光热材料的生物相容性与长期安全性仍需进行系统性验证。例如，黑磷在高湿度与光照下易发生光氧化降解，环境稳定性不足，应用时需关注降解途径与降解产物的安全性[64]。

此外，PPT 的有效 - 安全温度窗口较窄，当局部温度与照射累积时长超过阈值时，热损伤风险将显著增加，因此需要实施实时温度监测与标准化热剂量管理。当前，对该联合治疗方案的研究主要针

表 1　协同 MN 技术的 NIR-PPT 策略在不同皮肤病治疗中的研究进展

Tab.1　Research Progress of the NIR-PPT Combined with MN Technology for the Treatment of Various Skin Diseases

微针类型	药物	基质材料	光热转换剂	NIR 波长 /nm	应用	参考文献
可溶性微针	IL-17 mAb	HA	MXene	808	PsO	［17］
水凝胶微针	黄芩苷	HA	HEuB NPs	1 064	PsO	［36］
水凝胶微针	钙三醇	聚 *N*- 异丙基丙烯酰胺、聚乙二醇二丙烯酸酯	黑磷	—	PsO	［37］
可溶性微针	CPT	PVP K30、PVA 103	硫化铜	808	黑色素瘤	［43］
可溶性微针	DTIC	BSP、HA	ICG	808	黑色素瘤	［44］
可溶性微针	DOX	PVA、蔗糖	ICG	808	黑色素瘤	［45］
可溶性微针	FUC	PETOX、CS	Te NP	808	黑色素瘤	［46］
水凝胶微针	TA	PVP、琼脂糖、HA	BPQD	808	AD	［51］
水凝胶微针	PDA 纳米酶	HAMA、HA	PDA	808	AD	［27］
可溶性微针	W379	PVP	IR780	808	感染性创面	［56］
水凝胶微针	PDA（Gantrez™ S-97）	HA	PDA	808	感染性创面	［57］
可溶性微针	万古霉素	HA	AZC	1 064	伤口脓肿	［58］

对 PsO、黑色素瘤、AD 等疾病，对脱发、瘢痕修复等常见皮肤疾病的研究相对不足[65]。未来，相关研究可从以下方向深化。①材料创新方面。聚焦开发光热转换效率更高、可生物降解且易代谢的新型光热材料，同时探索低能耗相变体系，以扩大安全热阈范围。②结构优化方面。通过针尖富集、分层多仓、核 - 壳布局与层级微通道等结构设计策略，提升载药量及释放精度；并结合温度与光信号反馈，实现闭环控温和热剂量监测。③评价体系方面。推动建立统一的皮肤刺激性与致敏性评价方法（如 Draize 法、体外替代模型）。依据国际标准，结合经皮水分流失与红斑指数分析，完善生物相容性、光稳定性与长期代谢评估方法。④临床转化方面。建议推动多中心、随机对照的早期临床验证，研发可穿戴光源 -MN 一体化平台，构建剂量 - 热效应量化曲线，以提升 NIR-MN 联合策略的可比性与重复性。

参考文献：

［1］ ZHANG L, OUDENG G, WEN F Q, *et al*. Recent advances in near-infrared-Ⅱ hollow nanoplatforms for photothermal-based cancer treatment［J］. *Biomater Res*, 2022, **26**(1): 61.

［2］ ZHAO Y, WANG Y, WANG X Y, *et al*. Recent progress of photothermal therapy based on conjugated nanomaterials in combating microbial infections［J］. *Nanomaterials* (Basel), 2023, **13**(15): 2269.

［3］ HE Y L, HAO Y, CHU B Y, *et al*. Redox-activatable photothermal therapy and enzyme-mediated tumor starvation for synergistic cancer therapy［J］. *Nano Today*, 2021, **39**(1): 1-12.

［4］ YU S J, NI H F, XU X D, *et al*. Subcutaneous rapid dissolution microneedle patch integrated with CuO_2 and disulfiram for augmented antimelanoma efficacy through multimodal synergy of photothermal therapy, chemodynamic therapy, and chemotherapy［J］. *ACS Biomater Sci Eng*, 2023, **9**(11): 6425-6437.

［5］ XIONG Y, RAO Y, HU J W, *et al*. Nanoparticle-based photothermal therapy for breast cancer noninvasive treatment［J］. *Adv Mater*, 2025, **37**(31): e2305140.

［6］ 冯之资, 沈诗洋, 莫　然. 基于红细胞的仿生载体用于光热剂递送和肿瘤光热治疗的研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2022, **53**(1): 28-36.

［7］ YOUNIS M R, HE G, QU J, *et al*. Inorganic nanomaterials with intrinsic singlet oxygen generation for photodynamic therapy［J］. *Adv Mater*, 2021, **8**(21): e2102587.

［8］ XIE B, XIAO Z R, LING J B, *et al*. Exploring the application of metal-based photothermal agents in photothermal therapy combined with immune checkpoint therapy［J］. *Front Pharmacol*, 2025, **16**: 1553158.

［9］ SONG G, JIANG G H, LIU T Q, *et al*. Separable microneedles for synergistic chemo-photothermal therapy against superficial skin tumors［J］. *ACS Biomater Sci Eng*, 2020, **6**(7): 4116-4125.

［10］ XU J, HUANG Y, ZHAO Z H, *et al*. Recent progress and opportunities of wearable non-invasive epidermal sensors for skin disease diagnosis［J］. *Adv Healthc Mater*, 2025, **14**(3): e2402891.

[11] ZAHRA M, ZUBAIR A, ASLAM N, *et al*. Investigating the impact of perceived social stigmatization and social appearance anxiety on quality of life among patients with facial skin diseases [J]. *Arch Dermatol Res*, 2025, **317**(1): 198.

[12] BU J, DING R L, ZHOU L J, *et al*. Epidemiology of psoriasis and comorbid diseases: a narrative review [J]. *Front Immunol*, 2022, **13**: 880201.

[13] ARMSTRONG A W, MEHTA M D, SCHUPP C W, *et al*. Psoriasis prevalence in adults in the United States [J]. *JAMA Dermatol*, 2021, **157**(8): 940-946.

[14] YU K Y, CAO C, AN F L, *et al*. Analysis and contrast of psoriasis disease burden trends in China and globally from 1990 to 2021 [J]. *Front Public Health*, 2025, **13**: 1541292.

[15] TIAN J R, ZHANG D Y, YANG Y, *et al*. Global epidemiology of atopic dermatitis: a comprehensive systematic analysis and modelling study [J]. *Br J Dermatol*, 2023, **190**(1): 55-61.

[16] CORDAIN L, LINDEBERG S, HURTADO M, *et al*. Acne vulgaris: a disease of Western civilization [J]. *Arch Dermatol*, 2002, **138**(12): 1584-1590.

[17] WU D, SHOU X, YU Y R, *et al*. Biologics-loaded photothermally dissolvable hyaluronic acid microneedle patch for psoriasis treatment [J]. *Adv Funct Mater*, 2022, **32**(47): 2205847.

[18] GAO J P, YAN Y Y, GAO S G, *et al*. Heterogeneous Cu_2O-SnO_2 doped polydopamine fenton-like nanoenzymes for synergetic photothermal-chemodynamic antibacterial application [J]. *Acta Biomater*, 2024, **173**: 420-431.

[19] WANG H X, WANG W S, LI C P, *et al*. Flav7+DOX co-loaded separable microneedle for light-triggered chemo-thermal therapy of superficial tumors [J]. *Chem Eng J*, 2022, **428**: 131913.

[20] SALIMI M, MOSCA S, GARDNER B, *et al*. Nanoparticle mediated photothermal therapy limitation in clinical applications regarding pain management [J]. *Nanomaterials* (Basel), 2022, **12**(6): 922.

[21] ZENG L Z, LI X L, DENG Y A, *et al*. Dinuclear dicationic iridium complexes for highly synergistic photodynamic and photothermal therapy to chemoresistant cancer [J]. *Inorg Chem*, 2025, **64**(2): 967-977.

[22] MA Y J, WANG F Q, WANG D W, *et al*. Near-infrared-triggered release of self-accelerating cascade nanoreactor delivered by macrophages for synergistic tumor photothermal therapy/starvation therapy/chemodynamic therapy [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2025, **685**: 661-673.

[23] NGUYEN H X, BANGA A K. Advanced transdermal drug delivery system: a comprehensive review of microneedle technologies, novel designs, diverse applications, and critical challenges [J]. *Int J Pharm*, 2025, **670**: 125118.

[24] WANG Q, GAN Z Y, WANG X X, *et al*. Dissolving hyaluronic acid-based microneedles to transdermally deliver eugenol combined with photothermal therapy for acne vulgaris treatment [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, **16**(17): 21595-21609.

[25] 徐 婷, 葛黎明, 徐志朗, 等. 可溶性透明质酸微针经皮递送迷迭香酸协同光热抗菌的研究[J]. 高分子学报, 2025, **56**(10): 1745-1756.

[26] 王爱丽, 马银玲, 翟奕蒴, 等. 响应性微针用于皮肤黑色素瘤免疫治疗的研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2025, **56**(3): 328-334.

[27] ZHANG Y Y, ZHANG X X, WU X Y, *et al*. Photo-responsive polydopamine nanoenzyme microneedles with oxidative stress regulation ability for atopic dermatitis treatment [J]. *Nano Today*, 2024, **56**: 102241.

[28] QIN W B, QUAN G L, SUN Y, *et al*. Dissolving microneedles with spatiotemporally controlled pulsatile release nanosystem for synergistic chemo-photothermal therapy of melanoma [J]. *Theranostics*, 2020, **10**(18): 8179-8196.

[29] QI Z Z, YAN Z, TAN G H F, *et al*. Smart responsive microneedles for controlled drug delivery [J]. *Molecules*, 2023, **28**(21): 7411.

[30] GRIFFITHS C E M, ARMSTRONG A W, GUDJONSSON J E, *et al*. Psoriasis [J]. *Lancet*, 2021, **397**(10281): 1301-1315.

[31] YAMANAKA K, YAMAMOTO O, HONDA T. Pathophysiology of psoriasis: a review [J]. *J Dermatol*, 2021, **48**(6): 722-731.

[32] CHOVATIYA R. Atopic dermatitis (Eczema) [J]. *JAMA*, 2023, **329**(3): 268.

[33] GUO J, ZHANG H Y, LIN W R, *et al*. Signaling pathways and targeted therapies for psoriasis [J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2023, **8**(1): 437.

[34] MUDDASANI S, FLEISCHE A B Jr, FELDMAN S R. Treatment practices for psoriasis and how they are changing [J]. *J Am Acad Dermatol*, 2021, **84**(2): 579-581.

[35] YAO Q, ZHAI Y Y, HE Z M, *et al*. Water-responsive gel extends drug retention and facilitates skin penetration for curcumin topical delivery against psoriasis [J]. *Asian J*

Pharm Sci, 2023, **18**(2): 100782.

[36] XIA C L, FU X W, WANG Q, *et al*. Anti-ROS and NIR-Ⅱ-responsive hyaluronic acid microneedle loaded with baicalin nanoparticles for treatment of psoriasis [J]. *Macromol Rapid Commun*, 2024, **45**(15): e2400136.

[37] LU M H, ZHANG X X, CAI L J, *et al*. Black phosphorus hydrogel inverse opal microneedle patches for psoriasis treatment [J]. *Nano Today*, 2024, **54**: 102072.

[38] CULLEN J K, SIMMONS J L, PARSONS P G, *et al*. Topical treatments for skin cancer [J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2020, **153**: 54-64.

[39] REBECCA V W, SOMASUNDARAM R, HERLYN M. Pre-clinical modeling of cutaneous melanoma [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 2858.

[40] ARNOLD M, SINGH D, LAVERSANNE M, *et al*. Global burden of cutaneous melanoma in 2020 and projections to 2040 [J]. *JAMA Dermatol*, 2022, **158**(5): 495-503.

[41] OTTAVIANO M, GIUNTA E F, MARANDINO L, *et al*. Anorectal and genital mucosal melanoma: diagnostic challenges, current knowledge and therapeutic opportunities of rare melanomas [J]. *Biomedicines*, 2022, **10**(1): 150.

[42] GRIFFIN Z, MATTEI J. Mucosal melanoma: an overview of recent therapies [J]. *Curr Pharm Design*, 2026, **32**(4): 267-275.

[43] ZHAO Y T, ZHOU Y X, YANG D, *et al*. Intelligent and spatiotemporal drug release based on multifunctional nanoparticle-integrated dissolving microneedle system for synergetic chemo-photothermal therapy to eradicate melanoma [J]. *Acta biomater*, 2021, **135**(1): 164-178.

[44] LI P, LIU C H, ZHAO Y Y, *et al*. Multifunctional covalent organic framework-based microneedle patch for melanoma treatment [J]. *Biomacromolecules*, 2023, **24**(8): 3846-3857.

[45] WANG C Y, ZENG Y N, CHEN K F, *et al*. A self-monitoring microneedle patch for light-controlled synergistic treatment of melanoma [J]. *Bioact Mater*, 2023, **27**: 58-71.

[46] YE Z Y, LI Y S, SUN Y, *et al*. Tellurium nanoparticles and fucoidan-loaded dissolvable microneedles for combined photothermal therapy and anti-angiogenesis in melanoma treatment [J]. *Int J Biol Macromol*, 2025, **292**: 139153.

[47] LAUGHTER M R, MAYMONE M B C, MASHAYEKHI S, *et al*. The global burden of atopic dermatitis: lessons from the global burden of disease study 1990—2017 [J]. *Br J Dermatol*, 2021, **184**(2): 304-309.

[48] BOGUNIEWICZ M. Atopic dermatitis: best of guidelines and yardstick [J]. *Allergy Asthma Proc*, 2025, **46**(1): 19-25.

[49] FRAZIER W, BHARDWAJ N. Atopic dermatitis: diagnosis and treatment [J]. *Am Fam Physician*, 2020, **101**(10): 590-598.

[50] LARNEY C, COURTNEY A, YAZDABAD A, *et al*. Topical steroid withdrawal: an emerging challenge in the treatment of atopic dermatitis [J]. *J Peadiatr Child Health*, 2025, **61**(4): 545-548.

[51] SONG L W, FAN L, ZHANG Q F, *et al*. Multifunctional triamcinolone acetonide microneedle patches for atopic dermatitis treatment [J]. *Small Struct*, 2024, **5**(12): 2400302.

[52] BORAIA F, POMI F L, VACCARO M, *et al*. Oxidative stress and phototherapy in atopic dermatitis: mechanisms, role, and future perspectives [J]. *Biomolecules*, 2022, **12**(12): 1904.

[53] GALINIAK S, MOŁOŃ M, BIESIADECKI M, *et al*. The role of oxidative stress in atopic dermatitis and chronic urticaria [J]. *Antioxidants* (Basel), 2022, **11**(8): 1590.

[54] RAO H, TAN J B L. Polysaccharide-based hydrogels for atopic dermatitis management: a review [J]. *Carbohyd Polym*, 2025, **349**(Pt B): 122966.

[55] SU Y J, YRASTORZA J T, MATIS M, *et al*. Biofilms: formation, research models, potential targets, and methods for prevention and treatment [J]. *Adv Mater* (Weinh), 2022, **9**(29): e2203291.

[56] SU Y J, ANDRABI S M, SHAHRIAR S M S, *et al*. Triggered release of antimicrobial peptide from microneedle patches for treatment of wound biofilms [J]. *J Control Release*, 2023, **356**(1): 131-141.

[57] ZHENG G S, XIE J, YAO Y, *et al*. MgO@polydopamine nanoparticle-loaded photothermal microneedle patches combined with chitosan gel dressings for the treatment of infectious wounds [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, **16**(10): 12202-12216.

[58] JIN Y, CHU Z Y, ZHU P F, *et al*. Double-edged dissolving microneedle patches loaded with Zn/Ce composites and vancomycin for treatment of drug-resistant bacterial infected skin abscess [J]. *Small*, 2025, **21**(12): e2412165.

[59] LIU M, TANG Y W, YAN M J, *et al*. Self-regulating immunosuppressive tumor microenvironment by NIR-Ⅱ photothermal agent with anti-inflammatory activity for self-reinforcing immunotherapy synergy with cancer photothermal ablation [J]. *Bimaterials*, 2025, **318**: 123187.

[60] QIAN Y X, GAO Y T, WANG D, *et al*. A tactfully designed

photothermal agent collaborating with ascorbic acid for boosting maxillofacial wound healing [J]. *Natl Sci Rev*, 2024, **12**(2): nwae426.

[61] HE L N, DI D H, CHU X H, *et al*. Photothermal antibacterial materials to promote wound healing [J]. *J Control Release*, 2023, **363**: 180-200.

[62] MOAWAD F, POULIOT R, BRAMBILLA D. Dissolving microneedles in transdermal drug delivery: a critical analysis of limitations and translation challenges [J]. *J Control Release*, 2025, **383**: 113794.

[63] WANG Z, LIU L, LIU E G, *et al*. Carrier polymer-free dissolvable microneedles enable superhigh drug payload for percutaneous protein delivery [J]. *ACS Mater Lett*, 2024, **6**(11): 4980-4987.

[64] GAO S Y, WANG Y L, SUN J W, *et al*. Recent development in black phosphorus nanomaterials for anticancer applications [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, **2**: 1172524.

[65] YARMOLENKO P S, MOON E J, LANDON C, *et al*. Thresholds for thermal damage to normal tissues: an update [J]. *Int J Hyperthermia*, 2011, **27**(4): 320-343.

