

生物打印技术在皮肤组织工程的应用研究进展

吴 聪, 李泽宇, 李润泽*, 王光硕

河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月7日; 发布日期: 2026年4月21日

摘 要

皮肤是人体最大的屏障器官, 其缺损不仅影响外观, 更会引发感染等一系列临床问题。生物打印技术作为组织工程领域的新型组织工程手段, 能够依据数字模型精确调控种子细胞与生物材料在三维空间内的分布, 为实现个体化、结构仿生的皮肤组织构建提供了全新策略。本文系统综述了用于皮肤组织工程的生物墨水的研发进展, 并比较了不同生物打印技术的特性与适用性。同时, 深入探讨了该技术走向临床所面临的核心挑战, 并针对性地提出了可能的解决方案, 为生物打印技术在皮肤再生领域的深入发展与临床转化提供理论参考和实践思路。

关键词

生物打印, 皮肤组织工程, 生物墨水, 研究进展

Research Progress of Bioprinting Technology in Skin Tissue Engineering

Cong Wu, Zeyu Li, Runze Li*, Guangshuo Wang

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: March 15, 2026; accepted: April 7, 2026; published: April 21, 2026

Abstract

The skin, being the body's primary barrier organ, poses significant clinical challenges beyond cosmetic concerns when injured, primarily due to risks of infection. Bioprinting has emerged as a novel tissue engineering approach in tissue engineering, allowing for the precise, digital model-driven deposition of cells and biomaterials to create patient-specific, anatomically relevant skin constructs. This review comprehensively investigates the development of novel bioinks tailored for skin bioprinting and critically evaluates the capabilities and limitations of prevailing bioprinting techniques.

*通讯作者。

文章引用: 吴聪, 李泽宇, 李润泽, 王光硕. 生物打印技术在皮肤组织工程的应用研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 180-186. DOI: 10.12677/ms.2026.164084

Promising strategies to address these hurdles are also outlined, with the goal of informing future research directions and facilitating the translation of bioprinting technologies into effective clinical therapies for skin repair.

Keywords

Bioprinting, Skin Tissue Engineering, Biological Ink, Research Progress

Copyright © 2026 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. 引言

皮肤作为人体最大的体表器官,因其暴露于外界环境而易受损伤。尽管皮肤具备一定的自我再生修复能力,但当皮肤发生大面积严重损伤时,无法依靠自身有限的修复能力实现皮肤的再生修复[1]。皮肤移植(自体皮移植、异体皮移植)等传统的皮肤缺损修复手段存在供体来源有限、潜在免疫排斥、修复效果有限等不足,且难以满足复杂创面的个性化治疗需求。为弥补这些不足,需要开发一种新型的皮肤替代物来解决这一问题。

近年来,随着支架构建工艺的不断发展,生物打印技术开始应用于皮肤修复再生,并逐渐成为研究热点[2]。相比传统支架构建工艺,该技术能够依据预设的数字模型,在三维空间中精确地控制细胞、生物材料的空间分布,从而构建出高度仿生、结构可控的皮肤组织,实现对不同类型皮肤缺损的个性化治疗[3]。该技术不仅能控制支架的孔隙结构、形状和内部的构型,还能完成细胞在微环境中的精确定位,这为皮肤的修复提供了技术基础[4]。

从能够使用生物打印技术制造皮肤组织开始,相关研究在深度与广度上不断扩展:从打印单层细胞发展到制造完整的皮肤结构,从使用单一细胞类型到建立多种细胞的共同培养体系。这些进步使得该技术变得更加复杂,功能也更强。另外,在生物材料科学进步的推动下,为新型生物墨水的开发提供了更多的可能性[5]。虽然生物打印技术潜力很大,但是其发展仍存在许多挑战。本文会系统地介绍这项技术在皮肤组织工程中的最新研究进展,以及当前遇到的问题。

2. 生物墨水的进展

生物墨水是用于生物打印或生物 3D 打印的核心材料,是一种包含活细胞、生物活性因子,并具有特定物理化学性质(如流变性、交联能力)的功能性生物材料。Malda 等[6]认为,理想的生物墨水需要同时具备良好的可打印性、结构稳定性和生物相容性,这是生物打印的基本要求。

2.1. 从静态到动态的生物墨水

传统生物墨水主要基于静态网络结构,如常规明胶、藻酸盐和胶原等[7]。虽然传统的生物墨水具备一定的生物相容性等诸多优势,但其形成的结构通常是静态的,往往难以同时满足打印的工艺要求与理想的生物功能。为了解决这一问题,研究人员开发出了能够模拟天然细胞外基质(ECM)的动态生物墨水,与传统的静态生物墨水相比,动态生物墨水具有可逆性的动态分子网络,能够模拟天然 ECM,提供细胞活性和生长,从而促进生物打印类器官结构的成熟。

天然 ECM 是构成细胞外微环境的非细胞框架,主要由蛋白质、多糖和脂质等大分子物质组成。它除

为了细胞提供物理支撑外，还决定了细胞外环境特定的机械性质。与传统的静态网络不同，动态生物墨水被设计成能够模拟 ECM 的多种功能[5]。这种向动态材料的转变，为组织工程与再生医学的发展开辟了一种全新的研究方向。

作为生物打印的核心，生物墨水直接关系着后续皮肤修复再生的成功与否[8]。随着我们对皮肤复杂结构和功能了解的不断深入，生物墨水的研发重点也不再只是构建一个静态的支撑框架，而是研发一种具有智能响应能力的动态生物墨水，使其能够动态地模拟天然 ECM 的复杂特性，以便更好地调控细胞行为并促进组织再生。

2.2. 新型生物墨水的特性与功能

随着生物打印技术的不断发展，新型生物墨水的功能也日益多样化。近期，王华楠团队开发出一类由两性软甲基丙烯酸明胶(GelMA)纳米颗粒自组装而成的新型胶体凝胶生物墨水[9]。与传统的 GelMA 墨水相比，该墨水显示出优良的打印性能，并增加了对多种 3D 打印模式的适应性。由于存在可逆键和紫外引发的共价键，GelMA 胶体油墨表现出优异的印刷适性、形状保真度、广泛可调的机械性能和印刷温度稳健性。此外，与传统的聚合物凝胶网络相比，纳米胶体网络结构具备简单的药物负载和缓释能力，可以大大提高传质效率。

近期，研究人员通过一种新的多尺度非共价-共价协调机械响应策略，开发了一种接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯的新型阻尼弹性打印生物墨水[10]。该墨水不仅具有优异的力学性能，还具有显著的抗氧化活性，能够有效增强线粒体膜电位，降低细胞内活性氧水平。在氧化应激条件下，它能抑制基质金属蛋白酶(MMP13)的有害表达，同时促进具有保护作用的 II 型胶原蛋白合成，从而有助于恢复细胞微环境的稳态，并支持细胞外基质的重建。不同类型生物墨水的性能比较如表 1 所示。

Table 1. Performance comparison of different types of bioinks

表 1. 不同类型生物墨水的性能比较

生物墨水类型	主要优势	局限性	适用打印技术
传统静态墨水	生物相容性好，制备简单	机械性能差，降解不可控	挤出式、光固化
动态超分子墨水	自愈合，剪切稀化	机械强度低	挤出式、微球打印
动态共价键墨水	机械性能可调，稳定性好	响应速度慢	挤出式、光固化
纳米复合墨水	高机械强度，多功能集成	工艺复杂	多材料打印
刺激响应墨水	智能释放，环境响应	需要外部刺激	4D 打印、原位打印

2.3. 生物墨水的功能优化

目前，研究者更注重综合多种材料的优势，从而进一步提高生物墨水的性能。在近期一项针对伤口敷料的研究中，研究人员开发出了一种具有多功能夹层结构伤口敷料。该敷料采用三层设计：直接接触伤口的最内层为藻酸盐/壳聚糖水凝胶，其中负载了抗生素庆大霉素，可在感染导致的酸性环境中实现药物的针对性加速释放；中间层负载有促进血管生成的 L-精氨酸，能够缓慢释放以支持长期修复；最外层则为提供机械保护的无纺布[11]。该支架具备良好的亲水性，具有快速吸湿保湿能力，还能实现药物的可控释放，从而有效促进组织修复。这种 3D 生物打印的多层支架为皮肤再生领域提供了一种具有应用前景的新型伤口敷料方案。

同时，材料本身的创新也在推动生物墨水的发展。重组胶原蛋白(Recombinant collagen, RC)是利用基因拼接技术将所需人胶原蛋白基因克隆到适宜的载体后转移到表达体系内进行表达，再提取纯化生产的

蛋白质[12]。重组胶原蛋白因其具有高纯度、优良的批次稳定性以及良好的生物相容性等特性，正成为一种有潜力的生物墨水基质，可以有效地解决传统动物源胶原蛋白的常见问题。未来，通过结合材料科学、流体力学及细胞生物学等多学科知识，有望开发出能更好适应体内复杂环境的新型生物墨水，以支持组织更精准、快速地再生与整合。

3. 生物打印技术的分类

生物打印方法的选择直接影响构建的皮肤结构的完整性、细胞活性和功能表现。目前主流的生物打印技术包括挤出式、光固化和喷墨式等，每种技术各有优缺点，适用于不同的应用场景。不同类型生物打印技术的对比如表 2 所示。

Table 2. Comparison of different types of bioprinting technologies

表 2. 不同类型生物打印技术的比较

打印技术	分辨率	细胞密度	打印速度	主要优势	主要局限
挤出式打印	100~500 μm	高	中等	高粘度材料，结构稳定	剪切应力，细胞损伤
光固化打印	10~100 μm	中等	高	高分辨率，快速打印	光毒性，材料限制
喷墨打印	50~100 μm	低	非常高	高速，低成本	不稳定，细胞浓度低
激光辅助打印	10~50 μm	中等	低	无喷嘴堵塞，高细胞活力	设备复杂，成本高
同轴打印	100~300 μm	高	中等	多材料同时打印，中空结构	系统复杂，优化困难

挤出式生物打印通过气压、活塞或螺杆驱动，将生物墨水从喷嘴中连续挤出成型，是目前使用最广泛的技术[13]。其最大优势在于可处理高粘度墨水并承载高密度细胞，适合构建具有一定体积和机械强度的结构。然而，挤出过程中产生的剪切应力会对细胞造成损伤，尤其是在喷嘴壁附近区域，细胞死亡率较高。剪切应力大小与喷嘴直径、打印压力及墨水粘度直接相关，需通过参数优化予以控制。

在需要较高打印精度与速度时，光固化技术就显现出其优势。该技术具有分辨率高(可达微米级)和打印速度快的特点，但所使用的光引发剂及紫外线可能对细胞产生毒性[14]。随着新型可见光固化体系以及生物相容性更好的光引发剂的开发，这一问题正逐步得到改善。

对于需要极快打印速度与高分辨率的应用场景，则可以选择喷墨式打印[15]。该方法是一种基于喷墨打印工艺的生物打印技术，在计算机地控制下将生物墨水精准沉积到水凝胶基材或培养皿上。近年来，喷墨式生物打印在组织工程领域受到了广泛关注。

4. 临床转化的现实路径：法规、成本与标准化

生物打印皮肤作为融合细胞治疗、生物材料与先进制造技术的新型产品，其临床转化不仅依赖技术突破，更需突破法规监管、成本控制与标准化生产三大核心瓶颈。

4.1. 法规审批路径：以 FDA 细胞治疗产品监管为例

美国食品药品监督管理局(FDA)作为全球细胞治疗领域最具影响力的监管机构，依据《联邦食品、药品和化妆品法案》及《公共卫生服务法案》第 351 条和第 361 条的双重法律框架，将生物打印皮肤归类为“人体细胞与组织为基础的产品”，由生物制品评价与研究负责监管。根据产品特性，生物打印皮肤主要纳入 351 条监管路径，需按照生物制品许可申请(BLA)进行严格审批，完整流程分为四个核心阶段[16]。

第一阶段为预研会议(preIND)，研发机构可在提交临床试验申请(IND)前，就产品设计、非临床研究

方案、临床试验设计等关键内容与 FDA 进行沟通,明确技术要求与审批方向,减少后续申报风险。第二阶段为 IND 申报,研发机构需提交产品非临床研究数据、生产工艺细节、质量控制标准及临床试验方案, FDA 在收到申请后进行审查,决定是否允许开展临床试验。第三阶段为临床试验,需按 I、II、III 期逐步推进: I 期重点评估安全性,纳入少量受试者,观察细胞存活、创面反应及不良反应; II 期扩大样本量,探索最佳治疗剂量与适用人群,验证初步疗效; III 期为关键性试验,在更大范围的目标人群中,对比生物打印皮肤与现有标准疗法(如自体皮移植)的疗效与安全性,积累长期临床数据。第四阶段为 BLA 提交与审批,研发机构需提交完整的临床试验数据、生产工艺验证报告、质量体系证明等资料, FDA 进行全面审评,同时开展生产现场核查。

4.2. 成本构成与经济学比较

生物打印皮肤的成本主要分为四个部分[17]: 一是原材料成本(占比 30%~40%),包括种子细胞(如角质形成细胞、成纤维细胞)的分离、培养与扩增试剂,生物墨水基质(如重组胶原蛋白、GelMA)及生物活性因子,其中种子细胞培养的血清、生长因子是主要成本来源;二是设备与耗材成本(占比 25%~35%),涵盖生物打印机、打印喷嘴、培养皿等一次性耗材,以及设备维护与校准费用;三是生产与质量控制成本(占比 15%~20%),包括 GMP 车间运营、细胞与产品质量检测、人员培训等;四是研发成本(占比 10%~15%),主要为生物墨水优化、打印工艺改进、临床试验等前期投入。

目前,实验室级别生物打印皮肤的单位成本约为 8.7 美元/平方厘米,临床级产品单次治疗费用在 8 万至 12 万美元之间,而传统自体皮移植的单次治疗费用约为 1~3 万美元(不含后续护理费用)。从短期来看,生物打印皮肤的成本显著高于自体皮移植,但从长期疗效与综合成本来看,生物打印皮肤具有明显优势:自体皮移植存在供体短缺、取皮区损伤、术后疤痕明显等问题,后续疤痕修复、感染治疗等附加成本较高;而生物打印皮肤可实现个性化定制,无需取皮,减少供体损伤,且修复效果更接近天然皮肤,能降低后续护理成本。

4.3. 标准化生产的关键质量控制(QC)指标

生物打印皮肤的标准化生产是其临床转化的核心前提,需建立覆盖“原材料-生产过程-成品”的全流程质量控制体系,关键 QC 指标围绕安全性、有效性与一致性三大核心,结合相关标准与技术要求明确如下[18]。

原材料 QC 指标:一是种子细胞质量,需检测细胞纯度、细胞活性、无菌性及遗传稳定性;二是生物墨水质量,需控制粘度、流变性、交联效率,检测生物相容性及降解速率,同时控制批次差异,确保不同批次墨水性能一致;三是生物活性因子质量,需检测纯度、活性及稳定性,确保其在打印与储存过程中不失效。

生产过程 QC 指标:重点监控打印工艺参数的一致性,包括喷嘴直径、打印压力、打印速度、交联条件(如紫外光强度、照射时间),确保每批次产品的尺寸、孔隙结构、细胞分布均匀性符合预设标准;同时监控生产环境的洁净度,避免生产过程中的污染。

成品 QC 指标:一是物理性能,检测皮肤替代物的机械强度、柔韧性与吸水性,确保其能适应创面环境;二是生物学性能,检测成品细胞存活率、细胞增殖能力及功能表达;三是安全性,检测成品无菌性、内毒素含量及免疫原性,确保无异常免疫反应。此外,需建立产品可追溯体系,记录原材料来源、生产参数、检测结果等信息,实现全生命周期可追溯。

5. 临床转化挑战与未来展望

虽然生物打印技术在皮肤组织工程中已经取得了显著的进展,但是要从实验室向临床进行转化仍需

面临很多挑战[19][20]。生物打印皮肤技术面临的主要挑战与应对策略如表3所示。目前面临的主要挑战集中在三个方面：一是如何维持细胞在打印后的活力与长期功能；二是如何系统性优化生物墨水的综合性能；三是如何实现从实验室到临床的标准化与规模化制备。

Table 3. Key challenges and corresponding strategies for skin bioprinting technology

表 3. 生物打印皮肤技术面临的主要挑战与应对策略

挑战类别	具体问题	潜在解决方案	发展前景
技术挑战	细胞存活率低	优化打印参数, 改进喷嘴设计, 功能性生物墨水	短期内显著改善
	血管化不足	同轴打印, 促血管生成因子, 微流体灌注	中期可能突破
	性能不稳定	复合材料, 动态交联, 纳米增强	已有显著进展
生物学挑战	神经支配缺乏	神经干细胞整合, 神经营养因子	初步探索阶段
	功能不完整	多细胞共培养, 生物活性因子, 动态机械刺激	长期研究重点
	免疫整合困难	免疫细胞招募策略, 免疫调节材料	新兴研究方向
制造挑战	标准化缺乏	自动化生产, 质量控制系统	产业化关键
	规模化困难	多打印头并行, 生物反应器成熟	技术与成本平衡
	成本效益问题	简化流程, 可扩展材料	决定市场应用

生物打印技术最根本的挑战是确保细胞在打印过程中是否能长期保持存活与功能表达。虽然在打印后短期内维持细胞活力已取得很大进展, 但长期保持细胞功能和促进组织成熟仍是一个难题。在打印过程中产生的剪切力, 以及打印后结构中缺乏营养的环境, 常导致细胞(尤其是大尺寸结构内部的细胞)大量死亡。因此血管化成为制造具有一定厚度的皮肤替代物的关键前提。

生物墨水的性能优化也是另一个需要克服的困难。理想的生物墨水必须具有良好的流变性、适当力学强度和生物相容性等性能, 同时材料的长期稳定性与可控降解行为也是需要解决的重要问题。最重要的一个问题便是如何从实验室产品向临床产品的标准化与规模化生产转化。目前这项技术仍较多依赖于操作者的经验, 缺乏自动化、标准化的生产和质检流程, 这也是主要制约其产业化和成本控制的困难。因此只有将材料科学、生物学、工程学与临床医学等多个领域进行融合, 才能克服掉这些困难, 促进医学领域的发展。

为应对这些挑战, 生物打印技术未来的发展方向也逐渐明确。其中之一则是开发一种具有更加优异的仿生特性和动态响应能力的新一代智能生物墨水。研究人员也可以将生物打印与其他生物制造技术(如电纺丝、器官芯片和微流体)相结合, 从而创建出更复杂、功能更全面的皮肤模型。

6. 结论

针对各类原因导致的大面积皮肤缺损, 利用生物打印技术实现皮肤再生的相关研究已成为领域内的热点方向。生物打印技术能精确构建出仿生皮肤结构, 从而提升其修复效果, 为皮肤的修复提供了创新性的解决方案。生物墨水从静态向动态的发展, 进一步增强了材料的功能性。多种打印技术的组合使用, 进一步优化了皮肤的仿生构建水平。然而, 生物打印技术在临床转化时仍存在许多问题需要解决。因此, 随着生物打印技术与皮肤组织工程生物学机制研究的不断深入, 结合多学科的深度交叉协作, 未来有望运用生物打印技术成功构建出在组织结构与生理功能上高度接近天然皮肤的替代物。

参考文献

- [1] Weng, T., Zhang, W., Xia, Y., Wu, P., Yang, M., Jin, R., *et al.* (2021) 3D Bioprinting for Skin Tissue Engineering:

- Current Status and Perspectives. *Journal of Tissue Engineering*, **12**. <https://doi.org/10.1177/20417314211028574>
- [2] 魏进欢, 韦文龙, 李忠举, 张甜, 李媛. GelMA 水凝胶 3D 生物打印支架在伤口愈合中的研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(S2): 100-105.
- [3] 者漫, 鲁荣英, 马珊珊, 赵胤硕, 杨光, 邢飞. 生物打印技术在皮肤组织工程中的应用与研究进展[J]. 华西医学, 2025, 40(9): 1512-1517.
- [4] Manzoli, S., Merotto, E., Piccoli, M., Gobbo, P., Todros, S. and Pavan, P.G. (2025) An Overview of 3D Bioprinting Impact on Cell Viability: From Damage Assessment to Protection Solutions. *Journal of Functional Biomaterials*, **16**, Article 436. <https://doi.org/10.3390/jfb16120436>
- [5] Ma, D., Liu, J., Lu, W.W., Liu, W. and Ruan, C. (2026) Dynamic Bioinks for Tissue/organ Bioprinting: Principle, Challenge, and Perspective. *Progress in Materials Science*, **155**, Article ID: 101527. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101527>
- [6] Malda, J., Visser, J., Melchels, F.P., Jüngst, T., Hennink, W.E., Dhert, W.J.A., *et al.* (2013) 25th Anniversary Article: Engineering Hydrogels for Biofabrication. *Advanced Materials*, **25**, 5011-5028. <https://doi.org/10.1002/adma.201302042>
- [7] Lam, E.H.Y., Yu, F., Zhu, S. and Wang, Z. (2023) 3D Bioprinting for Next-Generation Personalized Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article 6357. <https://doi.org/10.3390/ijms24076357>
- [8] Chen, X.B., Fazel Anvari-Yazdi, A., Duan, X., Zimmerling, A., Gharraei, R., Sharma, N.K., *et al.* (2023) Biomaterials/Bioinks and Extrusion Bioprinting. *Bioactive Materials*, **28**, 511-536. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.06.006>
- [9] Wang, Q., Chen, K., Zhang, Y., Shao, F., Tan, X., Ying, Q., *et al.* (2025) Nanostructured GelMA Colloidal Gels as Bioinks for Freeform Multi-Mode 3D Printing: Better Replacement for the Classical GelMA Polymeric Inks. *Bioactive Materials*, **53**, 188-204. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.07.010>
- [10] Chen, T., Xing, H., He, X., Su, Z., Zan, G., Lin, K., *et al.* (2025) Advanced 3D Bioink Featuring Damping and Antioxidant for Micro-Nano Fabrication. *Materials Today Bio*, **35**, Article ID: 102522. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.102522>
- [11] Khoshnood, N., Frampton, J.P. and Zamanian, A. (2025) 3D Bioprinted Alginate/Chitosan-Based Sandwich-Structured Wound Dressing with Dual-Drug Release for Enhanced Skin Regeneration. *International Journal of Biological Macromolecules*, **332**, Article ID: 148428. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.148428>
- [12] 胡欢, 张蕪, 王建, 王力文, 刘倩, 程宁文, 张馨月, 李云兰. 重组胶原蛋白在生物医药方面的应用[J]. 生物化学与生物物理进展, 2025, 52(2): 395-416.
- [13] Dey, M. and Ozbolat, I.T. (2020) 3D Bioprinting of Cells, Tissues and Organs. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 14023. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70086-y>
- [14] Huang, M.S., Christakopoulos, F., Roth, J.G. and Heilshorn, S.C. (2025) Organoid Bioprinting: From Cells to Functional Tissues. *Nature Reviews Bioengineering*, **3**, 126-142. <https://doi.org/10.1038/s44222-024-00268-0>
- [15] Li, X., Liu, B., Pei, B., Chen, J., Zhou, D., Peng, J., *et al.* (2020) Inkjet Bioprinting of Biomaterials. *Chemical Reviews*, **120**, 10793-10833. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00008>
- [16] Vu, H.H. and Pariser, A.R. (2015) Pre—Investigational New Drug Meetings with the FDA: Evaluation of Meeting Content and Characteristics of Applications for New Drug and Biologic Products. *Therapeutic Innovation & Regulatory Science*, **49**, 434-442. <https://doi.org/10.1177/2168479014558275>
- [17] 连伟龙, 连琴, 焦天, 何晓宁, 赵明, 胡大海, 万敏. 皮肤修复生物 3D 打印的研究进展与挑战[J]. 光电工程, 2021, 48(8): 4-21.
- [18] 李玲, 丁文, 刘明. 基于干细胞与生物 3D 打印技术的皮肤组织工程研究与应用进展[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2024, 40(2): 198-207.
- [19] 吴崇, 冷雪辉. 生物打印在组织工程应用中的技术难题和前景展望[J]. 山西科技, 2020, 35(4): 21-28.
- [20] 太光平, 吴克, 蔡敬民. 皮肤组织工程进化与三维组织打印技术的机遇及挑战[J]. 生物学报, 2019, 36(2): 1-6.