

基于红光碳点光敏剂的活性收缩水凝胶 用于细菌感染的伤口愈合

郝永梁^{1,2}, 李 建^{1,2}, 王泽华^{1,2}, 葛介超^{1,2}

(1. 中国科学院理化技术研究所光化学转换与功能材料重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049)

摘要 以 *N*-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)、海藻酸钠(SA)和碳点(CDs)光敏剂为主要原料, 通过自由基聚合和钙离子交联的方法制备了一种基于红光碳点光敏剂的活性收缩水凝胶(PNSP Gel), 用于细菌感染的伤口愈合. PNSP Gel可在体温下(37 °C)通过活性收缩作用释放出 CDs 光敏剂, 进一步通过 CDs 光敏剂的光动力抗菌作用, 有效杀灭伤口部位的细菌, 促进伤口快速愈合. 研究表明, PNSP Gel具有良好的释药性能、光动力抗菌性能以及加速伤口愈合的能力, 为临床伤口管理提供了新的解决方案.

关键词 碳点; 光动力抗菌; 水凝胶; 伤口愈合

中图分类号 O636

文献标志码 A

doi: 10.7503/ejcu20240409

Active Shrinkage Hydrogel Based on Red Emissive Carbon Dots Photosensitizers for Bacterial Infected Wound Healing

HAO Yongliang^{1,2}, LI Jian^{1,2}, WANG Zehua^{1,2}, GE Jiechao^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An active shrinkage hydrogel based on red emissive carbon dots (CDs) photosensitizers (PSs) was developed for bacterial infected wound healing. The hydrogel was prepared by using *N*-isopropylacrylamide (NIPAM), sodium alginate (SA) and CDs PSs as precursors through free radical polymerization and calcium ion cross-linking. The hydrogel could release CDs PSs at body temperature (37 °C) due to the active shrinkage of the hydrogel. Upon light irradiation, the released CDs PSs can generate singlet oxygen to kill bacteria effectively in the wound site leading to rapid wound healing. *In vitro* and *in vivo* results suggest that the developed active shrinkage hydrogel has good drug release, photodynamic antibacterial effects and the ability to accelerate wound healing, thus providing a new type of hydrogel for clinical wound management.

Keywords Carbon dots; Photodynamic antibacterial; Hydrogel; Wound healing

皮肤作为人体最大的器官, 不仅是保护机体免受外界侵害的重要屏障, 还承担着复杂的生理功能, 如调节体温、感知外界刺激等^[1]. 然而, 在日常生活中, 皮肤不可避免地会受到各种损伤^[2], 导致伤口形成^[3]. 这些伤口若处理不当, 容易引发细菌感染, 延缓愈合过程, 甚至造成组织坏死和功能障

收稿日期: 2024-08-30. 网络首发日期: 2024-10-08.

联系人简介: 葛介超, 男, 博士, 研究员, 主要从事功能纳米材料(碳点/富勒烯/氧化石墨烯、聚合物、有机小分子纳米组装体等)在生物医学、能源环境方面的应用研究. E-mail: jchge2010@mail.ipc.ac.cn

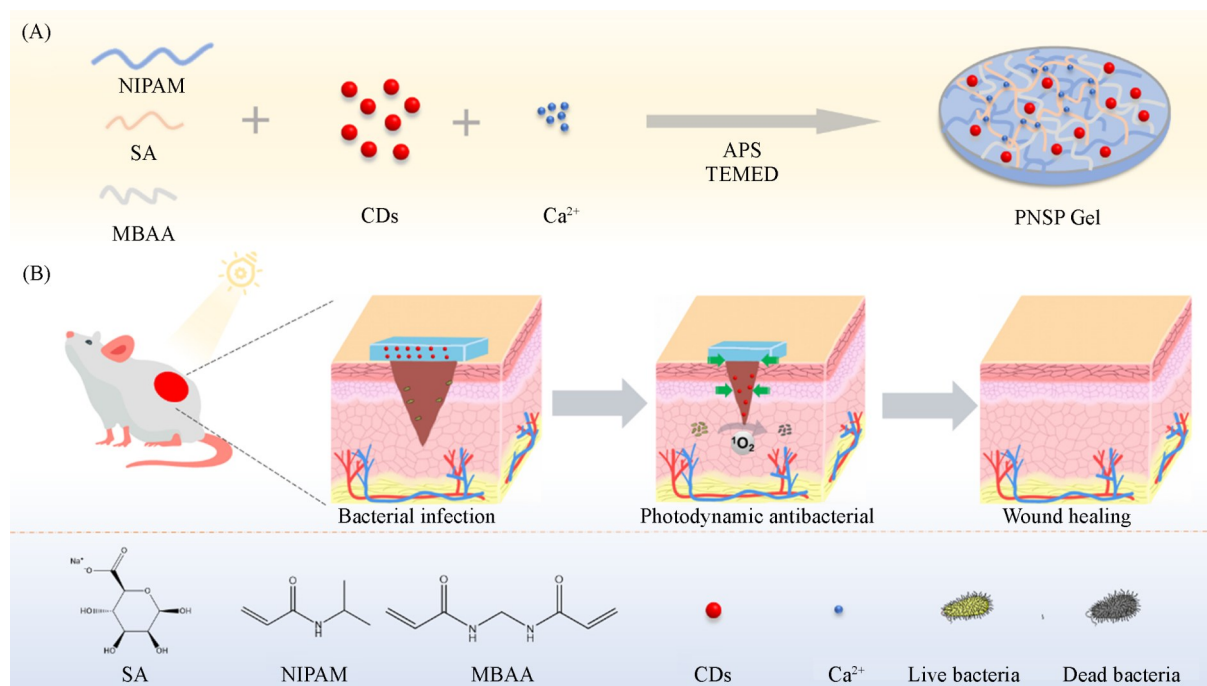
基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52272052)和国家重点研发计划项目(批准号: 2022YFA1207600)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.52272052) and the National Key Research and Development Program of China(No.2022YFA1207600).

碍^[4-6],严重影响患者的生活质量.伤口愈合是一个复杂且动态的过程,包括止血、炎症、增殖和重塑等多个阶段^[7].其中,细菌感染是伤口愈合过程的主要障碍之一^[8].为了有效预防和治疗伤口感染,研究人员一直在探索新的方法和材料^[9].近年来,水凝胶作为一种理想的生物材料,因具有良好的生物相容性、机械性能、维持创面湿润环境、促进细胞增殖和迁移以及加速伤口愈合等优点,在伤口愈合研究领域引起了广泛关注^[10,11].然而,传统水凝胶在抗菌性能方面存在不足,难以有效应对细菌感染的威胁.因此,开发具有抗菌功能的水凝胶成为目前伤口愈合研究领域的热点^[12,13].

光动力疗法(PDT)作为一种新兴的治疗方法^[14-16],以其无创性、时间和空间可控性以及较少的副作用等优势,在抗菌治疗领域展现出巨大的潜力^[17-19].碳点作为一种新型的纳米光敏剂^[20-22],具有尺寸小、易于表面功能化、稳定性高、亲水性强、生物相容性好和光学特性优异等优点,在PDT研究领域备受关注^[23-27].

本文设计制备了一种基于红光碳点光敏剂的活性收缩水凝胶(PNSP Gel),用于细菌感染的伤口愈合.以*N*-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)、海藻酸钠(SA)和碳点(CDs)光敏剂为主要原料,通过自由基聚合和钙离子交联的方法制备PNSP Gel.该PNSP Gel能够在体温下(37 °C)通过活性收缩作用释放出CDs光敏剂,进一步通过CDs光敏剂的光动力抗菌作用,有效杀灭伤口部位的细菌,促进伤口的快速愈合(Scheme 1).



Scheme 1 Schematic illustration of the preparation of the active shrinkage hydrogel(PNSP Gel)(A) and illustration of the PNSP Gel mechanism promoting wound healing(B)

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

N-异丙基丙烯酰胺(NIPAM, 纯度 98.0%)、海藻酸钠(SA, 分析纯)、*N,N'*-亚甲双丙烯酰胺(MBAA, 纯度 99.0%)、过硫酸铵(APS, 纯度 98.0%)、四甲基乙二胺(TEMED, 纯度 99.0%)和氯化钙(纯度 96.0%),北京伊诺凯科技有限公司;1-(3-二甲基氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺(EDC, 纯度 99.0%)、*N*-羟基琥珀酰亚胺(NHS, 纯度 98.0%)和壳聚糖(低黏度),上海麦克林生化科技有限公司;磷酸盐缓冲溶液(PBS, pH=7.2~7.4),上海源叶生物科技有限公司.

U-3900型紫外-可见(UV-Vis)分光光度计、F-4600型荧光分光光度计和S-4800型扫描电子显微镜(SEM),日本日立高新技术公司.

1.2 实验过程

1.2.1 CDs的制备 首先,参照文献[21]方法制备了碳点前驱体,将30 mg 前驱体分散在40 mL NaOH溶液(0.5 mmol/L)中超声处理30 min后,转移到不锈钢反应釜中,在180 °C下加热24 h. 冷却至室温后,用蒸馏水透析几次以去除残留的NaOH.

1.2.2 PNS Gel的制备 在25 °C下,取100 mg NIPAM和20 mg SA溶解于2 mL去离子水中,然后加入2 mg交联剂MBAA和2 μL TEMED,搅拌均匀后加入2 mg APS,得到预聚液. 将预聚液转移到准备好的模具中,置于4 °C冰箱中静置30 min,取出后浸泡在2% CaCl₂溶液中2 h得到PNS Gel.

1.2.3 PNSP Gel的制备 在25 °C下,取100 mg NIPAM和20 mg SA溶解于1.8 mL去离子水中,然后加入2 mg交联剂MBAA、2 μL TEMED和200 μL浓度为1 mg/mL的CDs溶液,搅拌均匀后加入2 mg APS得到预聚液. 将预聚液转移到准备好的模具中,于4 °C冰箱中静置30 min,取出后浸泡在2% CaCl₂溶液中2 h,得到PNSP Gel.

1.2.4 PNSP Gel的碳点释放性能测试 首先绘制CDs的浓度标准曲线,将PNSP Gel置于37 °C培养皿中,收集排出液体,通过CDs的浓度标准曲线计算排出的CDs浓度,并结合排出液体体积计算释放出的CDs总量.

将PNSP Gel置于37 °C培养皿中2 h并收集排出液体,选择9, 10-蒽二基-双(亚甲基)二甲酸(ABDA)作为¹O₂测定指示剂. 用白光(25 mW/cm²)照射不同时间. 在不同的指定时间点,用分光光度计测定溶液中残留ABDA的紫外-可见吸收光谱,记录了378 nm处(ABDA的最大吸收峰A₃₇₈)的吸光度值. 利用A₃₇₈计算光照射后ABDA的浓度变化和降解率(A/A₀),分析生成效率.

1.2.5 PNSP Gel的表面形貌 将PNSP Gel样品在液氮中淬灭,随后在冷冻干燥机中除去剩余水分,表面喷金后使用扫描电子显微镜观察表面形貌.

1.2.6 水凝胶的体外抗菌性能测试 以大肠杆菌(*E. coli*, 革兰氏阴性菌, ATCC 8099)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*, 革兰氏阳性菌, ATCC 6538)为研究对象,在37 °C TSB培养基中以220 r/min转速培养18~24 h,使细菌浓度至2×10⁹ CFU/mL,用生理盐水稀释至10⁸ CFU/mL. 将1 mL PNSP Gel加入1 mL细菌悬浮液中,将混合物在37 °C下孵育2 h,随后置于25 mW/cm²的白光下照射10 min. 取出细菌悬液,经梯度稀释,进行平板活菌计数.

1.2.7 活体实验 本研究中的所有动物实验程序均已获得中国科学院物理化学技术研究所实验动物福利伦理委员会的批准(批准文号: IACUC-IPC-24019). 动物实验在中国科学院理化技术研究所生物材料与医疗器械研究测试中心完成. 使用正常7~8周龄雌性Balb/c小鼠[Spelford(北京)生物技术有限公司]建立小鼠金黄色葡萄球菌感染全皮肤缺损创面小鼠模型. 在实验小鼠适应环境并保持2天后,在无菌条件下使用异氟烷诱导麻醉. 使用直径为8 mm的圆形冲头沿压痕切割皮肤,以造成完整的皮肤缺损创伤. 在每只小鼠伤口上接种50 μL金黄色葡萄球菌悬浮液(10⁹ CFU/mL). 将24只小鼠随机分为4组:(1)对照组(生理盐水、光照), (2) PNS Gel组(光照), (3) PNSP Gel(Light-)组(不光照), (4) PNSP Gel(Light+)组(光照). 分别在第0, 3, 6, 9和12天对伤口进行拍照并测量伤口面积. 在第6和12天,收集感染的伤口组织,用4%多聚甲醛保存,进行苏木精-伊红(H&E)染色和Masson染色.

1.2.8 生物相容性测试 将PNSP Gel应用于健康小鼠,以生理盐水组作为对照组,监测不同处理后小鼠的体重. 在第12天,从被处死的小鼠身上抽血,检测常规血液参数以及代表肝肾功能的血浆生化标志物. 同时,采集小鼠的主要器官(心脏、肝脏、脾脏、肺和肾脏)进行组织切片和H&E染色.

1.2.9 细菌SEM表征 将细菌在37 °C TSB培养基中以220 r/min转速培养18~24 h,使细菌浓度至2×10⁹ CFU/mL,用生理盐水稀释至10⁸ CFU/mL. 将1 mL PNSP Gel加入1 mL细菌悬浮液中,将混合物在37 °C下孵育2 h,随后置于25 mW/cm²的白光下照射10 min;离心(8000 r/min, 5 min)收集细菌,并在4 °C冰箱中浸泡2 h,然后置于5%戊二醛PBS溶液中过夜. 固定后,用生理盐水离心(8000 r/min, 5 min)洗涤细菌3次,并按顺序用30%, 50%, 70%, 85%, 95%和100%乙醇溶液进行脱水. 最后,将

6 μL 处理过的细菌溶液滴到干净的硅载玻片上, 喷金, 然后进行SEM表征.

2 结果与讨论

2.1 水凝胶的合成及性能表征

首先, 制备了具有光动力抗菌性能的CDs, 这种CDs水溶性好, 能够在水凝胶体系中完美分散. 采用传统的自由基聚合法, 将CDs与PNS Gel结合, 制备了具有光动力抗菌性能的PNSP Gel. 在PNSP Gel中, 主要的聚(*N*-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)网络具有温度敏感性, 在温度刺激下可以机械地收缩^[28,29], 同时引入了富含羧基的SA形成半互穿网络, 提高了水凝胶的生物相容性和机械强度. 为了提高水凝胶的物理均匀性, 将交联温度降低到4 $^{\circ}\text{C}$, 凝胶化30 min后得到更加透明均匀的PNSP Gel [图1(A)].

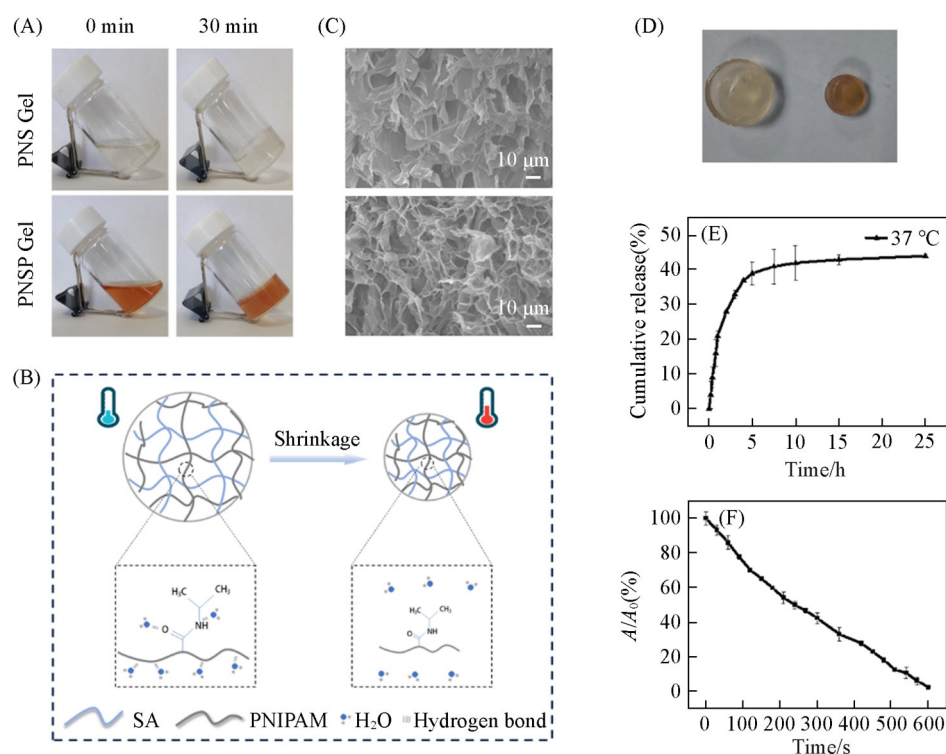


Fig. 1 Macroscopic observation of hydrogel formation of PNS Gel(above) and PNSP Gel (below) (A), schematic illustration of the contraction mechanism of PNIPAM at body temperature(B), SEM images of PNIPAM at different temperatures(C), the active shrinkage behavior of PNIPAM at 37 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h(D), cumulative release rate curve of CDs from PNIPAM(E), and ABDA degradation induced by CDs(F)

由于PNIPAM具有优异的热响应性, PNIPAM可以在体温条件下机械收缩[图1(B)], 为了验证这一点, 将PNIPAM置于37 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中模拟体温来评估其机械收缩性能, 通过SEM观察不同温度下水凝胶的变化, 由图1(C)可见, 37 $^{\circ}\text{C}$ 时水凝胶的孔径明显减小, 表明PNIPAM具有优异的温度敏感活性收缩性能, 图1(D)宏观地展示了PNIPAM体积缩小.

得益于CDs良好的水溶性, 在体温(37 $^{\circ}\text{C}$)条件下, 水凝胶发生机械收缩, CDs与水凝胶中的水分同时释放. 将含有100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ CDs的PNIPAM置于37 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中24 h, 通过测定释放出的液体中CDs浓度来评估水凝胶的释放CDs能力. 由图1(E)可见, 在0~4 h内CDs迅速释放, 释放量可达到40%; 在4~8 h内释放量减慢, 8 h后CDs释放量达到了平台期(约45%). 由于CDs在光照射下可产生单线态氧($^1\text{O}_2$), 将PNIPAM置于37 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中孵育1 h后, 测试其产生 $^1\text{O}_2$ 性能, ABDA降解曲线表明了 $^1\text{O}_2$ 的有效产生[图1(F)], 进一步说明在37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 水凝胶收缩导致CDs的有效释放^[21].

2.2 水凝胶的体外抗菌性能

采用菌落平板计数法评价了PNSP Gel的体外抗菌性能. 为了验证PNSP Gel的广谱抗菌性, 选用革兰氏阳性菌金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)与革兰氏阴性菌大肠杆菌(*E. coli*)为研究对象.

图2(A)为琼脂平板照片, 可见对照组的琼脂平板上生长了大量菌落, 随着PNSP Gel中CDs含量的增加, 琼脂平板上的菌落数逐渐减少. 图2(B)展示了琼脂平板计数结果, 当PNSP Gel中CDs浓度为20 $\mu\text{g/mL}$ 时, PNSP Gel对*S. aureus*与*E. coli*的抑菌率均达到50%以上. 当PNSP Gel中CDs浓度为100 $\mu\text{g/mL}$ 时, PNSP Gel对*S. aureus*与*E. coli*的抑菌率均达到99%以上. CDs带有正电荷, 可与带有负电荷的细菌细胞膜结合, 在光照条件下, CDs产生的 $^1\text{O}_2$ 破坏了细菌细胞膜, 导致细菌死亡. 为了验证这一作用机制, 将含有100 $\mu\text{g/mL}$ CDs的PNSP Gel与细菌置于37 $^\circ\text{C}$ 培养箱中共孵育2 h后取出. 由光动力杀菌前后*S. aureus*[图2(D)和(E)]与*E. coli*[图2(F)和(G)]的SEM图像可见, 细菌细胞膜被破坏. 以上结果表明, PNSP Gel具有良好的广谱抗菌性能.

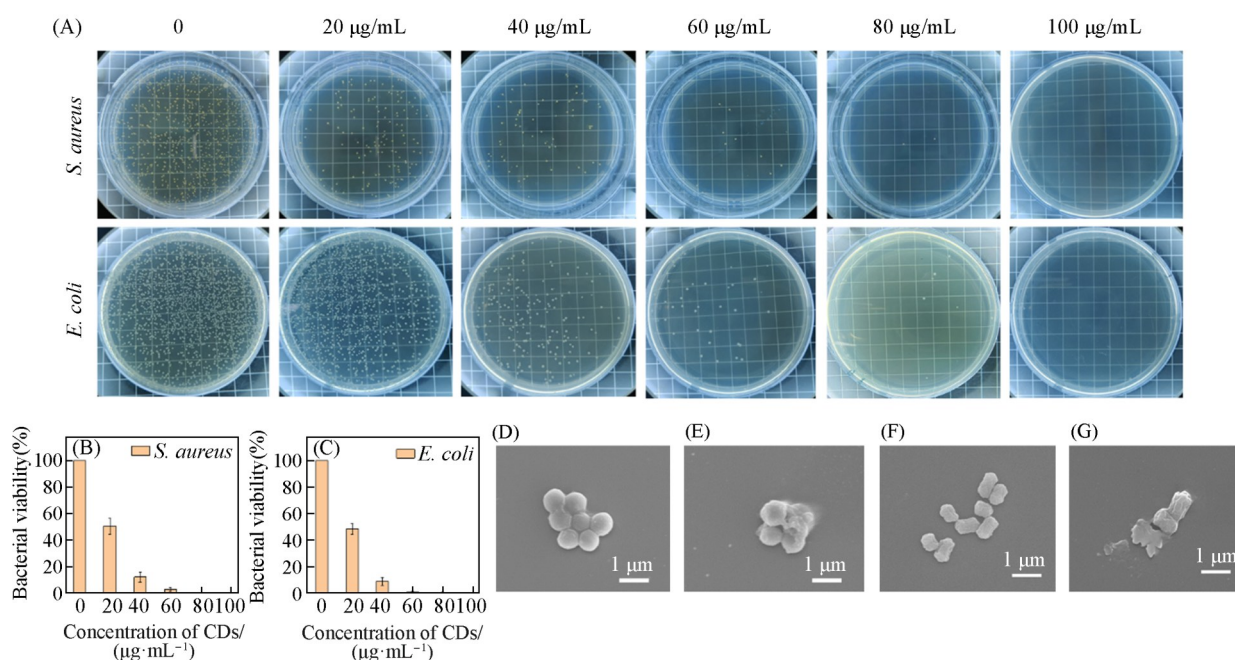


Fig. 2 Agar plate photographs(A) and statistical analysis of PDT data of *S. aureus*(B) and *E. coli*(C) incubated by PNSP Gel with different concentrations of CDs for 10 min with 25 mW/cm^2 xenon lamp irradiation, respectively, SEM images of *S. aureus* before(D) and after(E) treatment by PDT, and SEM images of *E. coli* before(F) and after(G) treatment by PDT

2.3 水凝胶加速伤口愈合

基于水凝胶优异的体外抗菌性能, 进一步评估了PNSP Gel在细菌感染伤口模型中的治疗能力. 按照图3(A)的步骤, 建立了*S. aureus*感染的全皮肤缺损创面小鼠模型. 对不同处理后的创面进行监测和组织学分析. 所有小鼠随机分为4组: (1) 对照组(生理盐水+光照), (2) PNS Gel(光照)组, (3) PNS Gel(Light-)(不光照)组, (4) PNS Gel(Light+)(光照)组. 在第0, 3, 6, 9, 12天对小鼠的伤口区域进行拍照和测量[图3(B)], 可以看到, PNS Gel(Light+)组的伤口愈合速度最快, 这是水凝胶机械收缩与光动力抗菌共同作用的结果. 图3(C)显示了治疗期间小鼠伤口变化情况, PNS Gel组与PNS Gel(Light-)组伤口愈合速度快于对照组, 这说明伤口表面的水凝胶作为敷料, 能够在体温的刺激下机械收缩带动伤口闭合, PNS Gel(Light+)组的伤口愈合速度最快, 这说明光动力杀菌作用显著, 加速了伤口的愈合进程.

为了进一步评估治疗效果, 对第6和12天收集的伤口皮肤组织进行苏木精&伊红(H&E)染色和马松(Masson)染色. 图4为H&E染色结果, 可见在第6天对照组、PNS Gel组和PNS Gel(Light-)

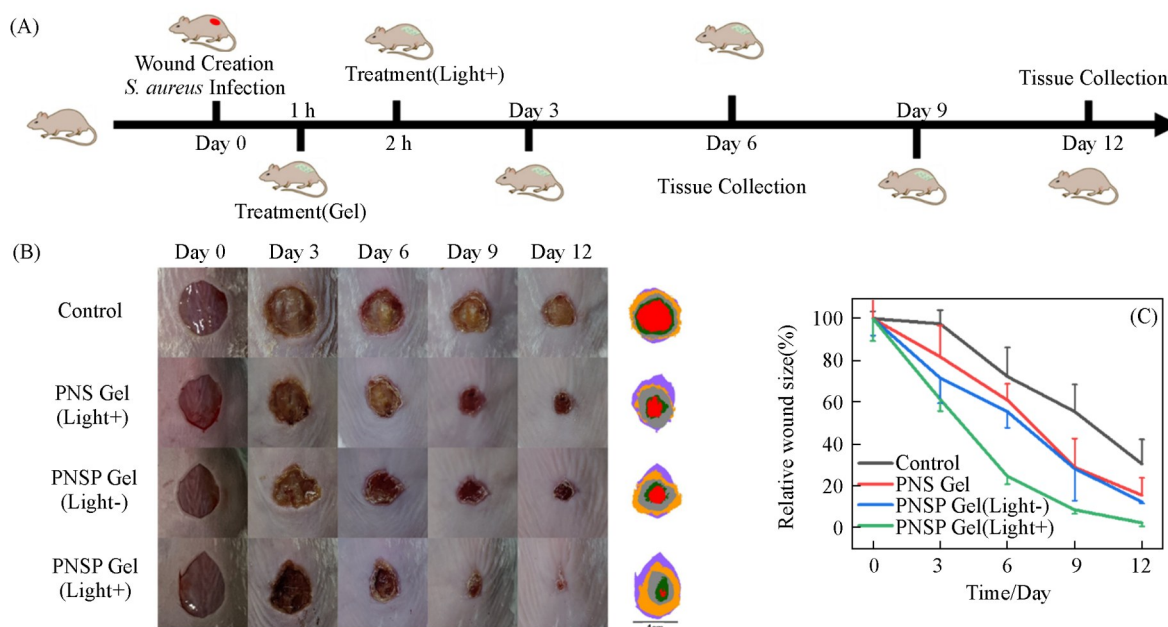


Fig. 3 Schematic illustration of the construction and treatment process of *S. aureus* infected mouse injury model(A), representative photos of the wound healing process in mice treated with control, PNS Gel, PNSP Gel(Light-) and PNSP Gel(Light+) (B), and relative area changes of infected wounds during treatments(C)

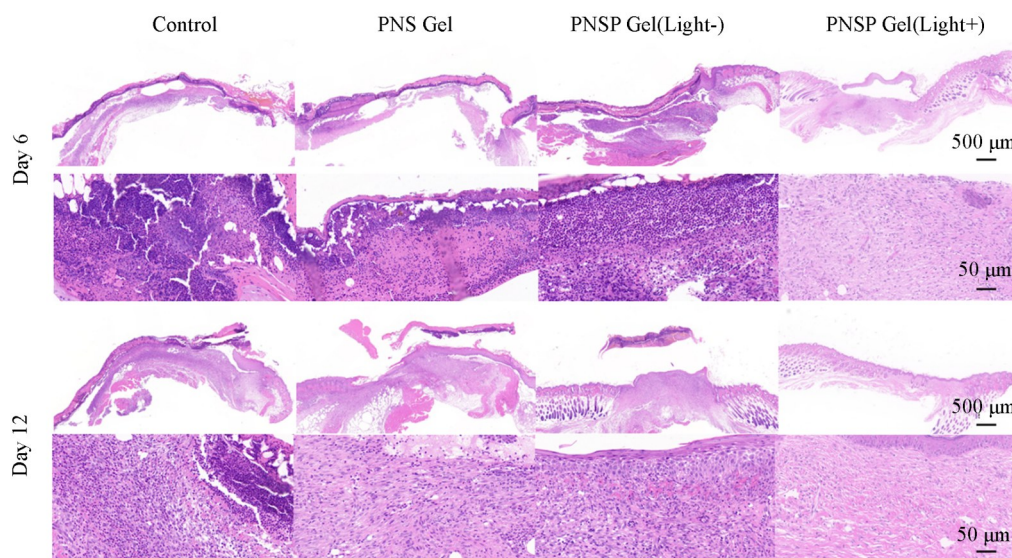


Fig. 4 Histological analysis of wound skin tissue collected on day 6 and day 12 from different treated groups by H&E staining

组有细菌聚集体的存在, 有大量的中性粒细胞浸润, 炎症反应明显^[30,31], 表皮不完整. 相比之下, PNSP Gel(Light+)组表现出了紧密连接的表皮结构, 中性粒细胞浸润较少, 炎症反应小. 在第12天, 对照组、PNS Gel组和PNSP Gel(Light-)组仍有少量的中性粒细胞浸润, PNSP Gel(Light+)组则观察到大量的成纤维细胞和新生血管, 表现出完整的表皮结构. 图5为Masson染色结果, 在第6天对照组、PNS Gel组、PNSP Gel(Light-)组存在大量被破坏的肌纤维^[32,33]. 相比之下, PNSP Gel(Light+)组蓝色面积变大, 说明胶原开始沉积. 在第12天, 相比于对照组、PNS Gel组和PNSP Gel(Light-)组, PNSP Gel(Light+)组胶原沉积更密集, 胶原纤维排列更有序. 这说明PNSP Gel(Light+)组的愈合效率更高.

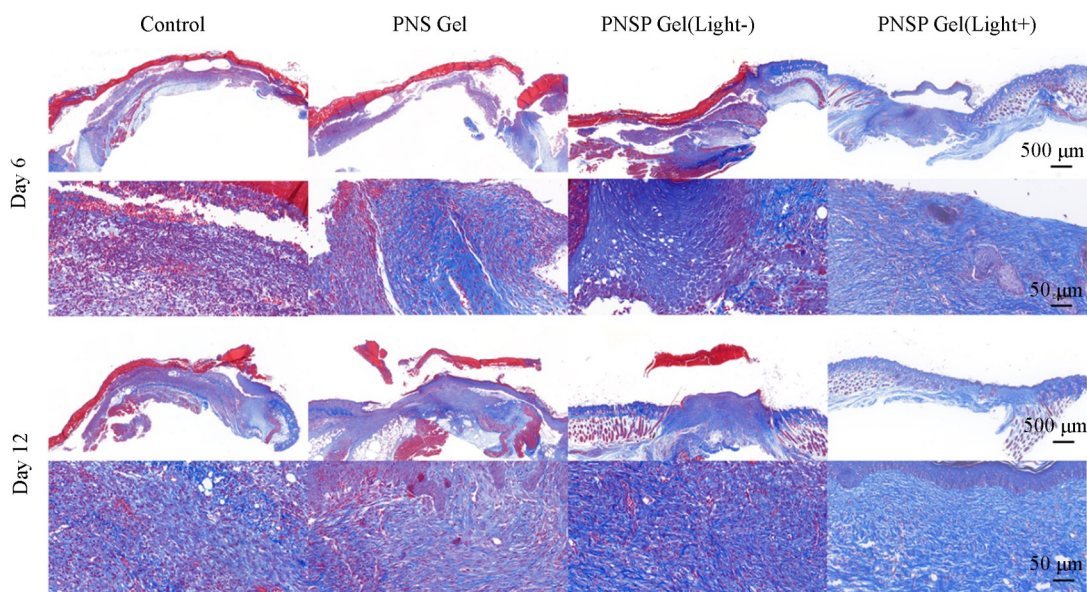


Fig. 5 Masson Trichrome staining images of wound skin tissue collected on day 6 and day 12 from different treated groups

2.4 生物安全性评价

为了评估 PNSP Gel 的生物安全性, 以生理盐水治疗的健康小鼠作为对照组, PNSP Gel 治疗第 12 天小鼠为实验组, 采集心、肝、脾、肺、肾进行 H&E 染色. 图 6 示出了 H&E 染色结果, 显示 PNSP Gel (Light+) 没有对组织产生损伤、炎症浸润或者其它异常. 这说明 PNSP Gel (Light+) 治疗具有优异的生物安全性.

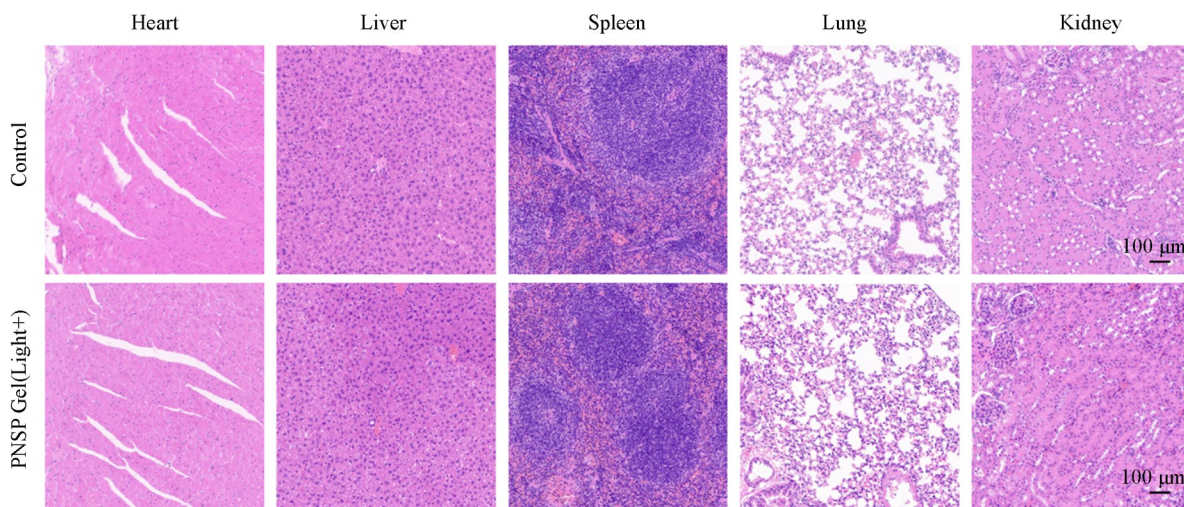


Fig. 6 H&E staining of different organs of healthy mice with different treatments

3 结 论

以 NIPAM, SA 和 CDs 为原料, 通过自由基聚合和钙离子交联制备了 PNSP Gel; 探究了水凝胶敷料的 CDs 释放性能、光动力抗菌性能和加速伤口愈合性能. 研究表明, 制备的活性收缩水凝胶具有良好的释药性能、光动力抗菌性能以及加速伤口愈合的能力; 还具备良好的生物安全性. 这种新型的碳点光敏剂基水凝胶为促进细菌感染的伤口愈合提供了新材料和新途径.

参 考 文 献

- [1] Peate I., *British J. Healthcare Assistants*, **2021**, 15(9), 446—451
- [2] Harth W., *Kanerva's Occupational Dermatology*, **2020**, 1209—1221
- [3] Nethi S. K., Das S., Patra C. R., Mukherjee S., *Biomater. Sci.*, **2019**, 7(7), 2652—2674
- [4] Jia Y., Zhang X., Yang W., Lin C., Tao B., Deng Z., Gao P., Yang Y., Cai K., *J. Mater. Chem. B*, **2022**, 10(15), 2875—2888
- [5] Rezaie F., Momeni-Moghaddam M., Naderi-Meshkin H., *Int. J. Low. Extr. Wound*, **2019**, 18(3), 247—261
- [6] Xue M., Jackson C. J., *Adv. Wound. Care*, **2015**, 4(3), 119—136
- [7] Enoch S., Leaper D. J., *Surgery(Oxford)*, **2008**, 26(2), 31—37
- [8] Kalelkar P. P., Riddick M., García A. J., *Nat. Rev. Mater*, **2022**, 7(1), 39—54
- [9] Noor A., Afzal A., Masood R., Khaliq Z., Ahmad S., Ahmad F., Qadir M.-B., Irfan M., *J. Mater. Sci.*, **2022**, 57(12), 6536—6572
- [10] Huangfu Y., Li S., Deng L., Zhang J., Huang P., Feng Z., Kong D., Wang W., Dong A., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, 13(50), 59695—59707
- [11] Wang W., Jia B., Xu H., Li Z., Qiao L., Zhao Y., Huang H., Zhao X., Guo B., *Chem. Eng. J.*, **2023**, 468, 143362
- [12] Yuan Y., Shen S., Fan D., *Biomaterials*, **2021**, 276, 120838
- [13] Sun X., Ding C., Qin M., Li J., *Small*, **2024**, 20(11), 2306960
- [14] Wang Z., Du B., Gao X., Huang Y., Li M., Yu Z., Li J., Shi X., Deng Y., Liang K., *Nano Today*, **2022**, 46, 101595
- [15] Chen J., Liu Y., Cheng G., Guo J., Du S., Qiu J., Wang C., Li C., Yang X., Chen T., *Small*, **2022**, 18(27), 2201300
- [16] Chua M. H., Chin K. L. O., Loh X. J., Zhu Q., Xu J., *ACS Nano*, **2023**, 17(3), 1845—1878
- [17] Zhu H., Zheng J., Oh X. Y., Chan C. Y., Low B. Q. L., Tor J. Q., Jiang W., Ye E., Loh X. J., Li Z., *ACS Nano*, **2023**, 17(9), 7953—7978
- [18] Lee C. H., Song S. Y., Chung Y. J., Choi E. K., Jang J., Lee D. H., Kim H. D., Kim D. U., Park C. B., *ACS Appl. Bio. Mater.*, **2022**, 5(2), 761—770
- [19] Song W., Wang X., Nong S., Wang M., Kang S., Wang F., Xu L., *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 2402761
- [20] Ge J., Jia Q., Liu W., Lan M., Zhou B., Guo L., Zhou H., Zhang H., Wang Y., Gu Y., Meng X., Wang P., *Adv. Healthc. Mater.*, **2016**, 5(6), 665—675
- [21] Ge J., Lan M., Zhou B., Liu W., Guo L., Wang H., Jia Q., Niu G., Huang X., Zhou H., Meng X., Wang P., Lee C. S., Zhang W., Han X., *Nat. Commun.*, **2014**, 5, 4596
- [22] Chen T., Yao T., Peng H., Whittaker A. K., Li Y., Zhu S., Wang Z., *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(45), 2106079
- [23] Liu M., Huang L., Xu X., Wei X., Yang X., Li X., Wang B., Xu Y., Li L., Yang Z., *ACS Nano*, **2022**, 16(6), 9479—9497
- [24] Mou C., Wang X., Teng J., Xie Z., Zheng M., *J. Nanobiotechnology*, **2022**, 20(1), 368
- [25] Ge J., Jia Q., Liu W., Guo L., Liu Q., Lan M., Zhang H., Meng X., Wang P., *Adv. Mater.*, **2015**, 27(28), 4169—4177
- [26] Cheng W., Zeng X., Chen H., Li Z., Zeng W., Mei L., Zhao Y., *ACS Nano*, **2019**, 13, 8537
- [27] Ge J., Lan M., Liu W., Jia Q., Guo L., Zhou B., Meng X., Niu G., Wang P., *Sci. China Mater.*, **2016**, 59(1), 12—19
- [28] Hu J., Wei T., Zhao H., Chen M., Tan Y., Ji Z., Jin Q., Shen J., Han Y., Yang N., Chen L., Xiao Z., Zhang H., Liu Z., Chen Q., *Matter*, **2021**, 4(9), 2985—3000
- [29] Dharmasiri M. B., Mudiyansele T. K., *Polym. Bull.*, **2021**, 78, 3183—3198
- [30] Xiao L., Feng M., Chen C., Xiao Q., Cui Y., Zhang Y., *Adv. Mater.*, **2023**, 2304982
- [31] Wang Y., Chen P., Liu W., Wei X., Zhang J., Wei X., Liu Y., Rao L., Zhang S., Yu J., Ye X., Wang J., Gu Z., *Nano Today*, **2023**, 51, 101937
- [32] Sun J., Jia W., Qi H., Huo J., Liao X., Xu Y., Wang J., Sun Z., Liu Y., Liu J., Zhen M., Wang C., Bai C., *Adv. Mater.*, **2024**, 2312440
- [33] Shou Y., Le Z., Cheng H. S., Liu Q., Ng Y. Z., Becker D. L., Li X., Liu L., Xue C., Yeo N. J. Y., Tan R., Low J., Kumar A. R. K., Wu K. Z., Li H., Cheung C., Lim C. T., Tan N. S., Chen Y., Liu Z., Tay A., *Adv. Mater.*, **2023**, 35(47), 2304638

(Ed.: N, K)