

• 综 述 •

中药衍生碳点的绿色合成与抗菌应用：研究进展与未来挑战

周 意^{1,2}, 周正杰^{1,3}, 曾今诚^{1,3*}

1. 广东医科大学, 广东省医学免疫与分子诊断重点实验室, 东莞市医学活性分子开发与转化重点实验室, 广东 东莞 523808
2. 广州医科大学附属中医医院, 广东 广州 510630
3. 广东省宪华医学研究院, 广东 东莞 523808

摘要: 全球抗菌药物耐药性危机持续加剧, 被世界卫生组织列为十大公共卫生威胁之一。传统抗菌药物疗效逐渐下降, 急需开发新型抗菌制剂。碳点作为一种新兴碳纳米材料, 凭借其优异的纳米特性, 在抗菌领域展现出广阔前景。近年来, 基于绿色合成理念, 研究人员创新性地采用中药材作为碳源, 通过水热法等制备出中药衍生碳点 (traditional Chinese medicine-derived carbon dots, TCM-CDs)。该类碳点不仅继承中药本身的活性成分, 具备多靶点抗菌、不易诱导耐药性的特点, 还表现出独特的纳米生物学效应, 为应对耐药菌感染提供了新策略。通过系统综述 TCM-CDs 的制备方法、结构表征与功能特性, 重点探讨其在伤口感染治疗中的应用潜力与机制, 并分析其临床转化与安全性评价面临的挑战, 为抗感染纳米药物的研发提供参考。

关键词: 碳点; 中药衍生碳点; 制备方法; 表征方法; 抗菌剂

中图分类号: R28 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)23-8768-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.23.026

Green synthesis and antibacterial application of carbon dots derived from traditional Chinese medicine: Research progress and future challenges

ZHOU Yi^{1,2}, ZHOU Zhengjie^{1,3}, ZENG Jincheng^{1,3}

1. Dongguan Key Laboratory of Medical Bioactive Molecular Developmental and Translational Research, Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Immunology and Molecular Diagnostics, Guangdong Medical University, Dongguan 523808, China
2. The Affiliated Traditional Chinese Medicine Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510630, China
3. Xianhua Medical Research Academy of Guangdong, Dongguan 523808, China

Abstract: The global crisis of antimicrobial resistance (AMR) continues to intensify and has been listed as one of the top ten public health threats by the World Health Organization. The efficacy of traditional antibiotics is gradually declining, and there is an urgent need to develop new antibacterial agents. Carbon dots, as an emerging carbon nanomaterial, have shown broad prospects in the field of antibacterial field due to their excellent nanoscale properties. In recent years, based on the concept of green synthesis, researchers have innovatively used traditional Chinese medicine as a carbon source to prepare traditional Chinese medicine derived carbon dots (TCM-CDs) through hydrothermal methods. This type of carbon dot not only inherits the active ingredients of traditional Chinese medicine itself, but also has the characteristics of multi-target antibacterial and not easily inducing drug resistance. It also exhibits unique nanobiological effects, providing a new strategy for dealing with drug-resistant bacterial infections. This article provides a systematic review of the preparation methods, structural characterization, and functional properties of TCM-CDs, with a focus on exploring their potential and mechanisms for application in wound infection treatment. It also analyzes the challenges faced in their clinical translation and safety evaluation, with the aim of providing reference for the development of anti-infective nanomedicines.

收稿日期: 2025-06-17

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目 (GDMU2023374, GDMU2023287); 广东医科大学本科生创新创业教育基地项目 (JDXM2024104); 广东省教育厅“创新强校工程”科研项目 (2024KQNCX108)

作者简介: 周 意, 主管技师, 研究方向为细菌检测与耐药分析。E-mail: 470495665@qq.com

*通信作者: 曾今诚, 副研究员, 博士生导师, 从事医用细胞免疫生物学特性和临床诊疗转化策略研究。E-mail: zengjc@gdmu.edu.cn

Key words: carbon dots; traditional Chinese medicine-derived carbon dots; preparation methods; characterization methods; antibacterial agents

抗微生物耐药性 (antimicrobial resistance, AMR) 已成为全球重大健康威胁。据预测到 2050 年, 每年因 AMR 死亡的人数高达 1 000 万人^[1]。目前抗菌药物研发面临停滞, 迫切需要开发具有新机制、低耐药诱导性的抗菌药物。碳点是一种粒径通常小于 10 nm 的新型碳纳米材料^[2], 凭借其可精确调控的理化性质和优异的生物相容性^[3], 在抗菌应用中潜力显著。依据碳源性质, 碳点可分为化学合成与生物质衍生 2 种。其中, 以植物提取物、中药等可再生资源为碳源的绿色合成, 因环境友好、成本低和生物安全性高而备受关注^[4]。中药富含结构多样性的生物活性成分 (如多酚、生物碱等)^[5], 以其为前体制备中药衍生碳点 (traditional Chinese medicine-derived carbon dots, TCM-CDs) 在碳化过程中不仅有效保留了原药材的核心药理活性成分, 并与纳米结构协同增强, 表现出多重医学功能, 已在止血^[6-7]、胃肠道疾病^[8-10]、心血管疾病^[11-12]、神精心理疾病^[13-14]及抗菌^[15-17]等领域取得了研究进展。现有抗菌治疗过度依赖传统抗菌药物, 加剧了耐药性蔓延。不少具有清热解毒功效的中药已被证实具有良好抗菌活性^[18-20], 因此以此类中药制备 TCM-CDs, 有望进一步增强其抗菌效能并拓展应用价值。研究表明, TCM-CDs 可通过破坏细菌膜结构、干扰代谢过程等机制抑制病原菌^[21-23], 为解决耐药性问题提供了新的研究思路和潜在突破口。

本文将聚焦于 TCM-CDs 的合成路径、多机制抗菌特性及其在不同感染场景中的应用, 总结其制备方法、构效关系与表征技术, 讨论临床转化中的关键问题与未来方向, 为发展新一代高效、低耐药性的抗菌纳米制剂提供理论与技术支撑。

1 TCM-CDs 的合成及表征

1.1 合成方法

TCM-CDs 制备方法体系日趋成熟, 可适配不同中药成分特性与应用场景需求。中药材不同部位所含生物活性成分的差异, 会显著影响 TCM-CDs 的性质与应用。如根茎类药材通常富含多糖和皂苷, 其制备的 TCM-CDs 往往表现出良好的抗炎及免疫调节活性^[24]。而叶类药材富含黄酮与酚类化合物, 所制备的 TCM-CDs 则常具有优异的抗氧化特性^[25]。制备 TCM-CDs 的碳源选择广泛, 涵盖单味药材、复方制

剂乃至中药制药过程的副产物^[26]。不同碳源会导致产物粒径、表面电荷及化学官能团差异^[27], 反应温度、时间也是关键合成参数^[28]。碳点的合成策略依据碳源类型分为 2 大类: 自上而下法与自下而上法。自上而下法是通过物理或化学手段将大尺寸碳材料分解成纳米尺度的碳点, 常用方法包括激光烧蚀、电弧放电和电化学氧化等, 此类方法常采用苛刻的实验条件 (如强酸和电弧排放)、繁琐的操作步骤和昂贵的设备, 极大地限制了其实际应用。而自下而上法是将碳材料通过热解或碳化形成所需尺寸范围的纳米颗粒, 具有操作简单、环境友好等优点^[29], 且自下而上法在粒径精准调控和表面功能化修饰方面更具优势^[30], 是当前制备 TCM-CDs 最常用的策略, 包括水热法、高温热解法及微波辐照法等。

1.1.1 水热法 水热法通常在密闭反应釜的水相环境中实现生物质转化。其典型流程包括药材预处理、高温高压水解、透析纯化及冷冻干燥等步骤^[31]。其核心优势在于: 一方面, 中药中富含的羟基、羧基等基团在水热条件下可形成寡糖或脂肪链并缩合于碳点表面, 赋予 TCM-CDs 良好的水溶性和稳定的生物活性^[22,32]; 另一方面, 该过程通常无需额外的钝化或氧化步骤即可直接获得表面功能化的产物, 不仅简化了流程, 更显著提升了产物的安全性和生物相容性。因此, 水热法被视为一种操作简便、环境友好的 TCM-CDs 制备方法^[33], 但该方法也存在制备周期长、量子产率波动较大等技术瓶颈。

1.1.2 高温热解法 高温热解法是制备 TCM-CDs 的另一重要技术。其原理基于热化学转化: 将药材在惰性气体 (如氮气、氩气) 保护下经历可控的梯度升温过程进行碳化。该方法核心特征在于无需溶剂参与、制备效率高且易于规模化放大。但其主要挑战在于高温环境易导致部分热敏性中药活性成分降解, 且合成的 TCM-CDs 量子产率通常偏低, 通过精细调控热解温度、持续时间及前驱体 pH 值等参数, 可在一定程度上优化产物性能^[34]。

1.1.3 微波辐照法 微波合成技术利用微波场对极性分子的选择性高效加热效应, 能在数分钟内快速完成药材碳化过程^[35-36], 是目前公认最高效、最省时的碳点合成方法之一。其能量传递机制涉及分子间共振与介电损耗的协同作用, 有利于实现原子尺

度的精准结构调控^[27]。微波法具备反应速率极快^[37]、能耗低、产物粒径分布窄且均一等显著优势,然而,该技术对反应体系的温度控制精度要求极为严苛,且不同批次产物的形貌一致性仍有待提高。

上述 TCM-CDs 的合成方法是通过温和工艺,将中药或天然植物转化为发光的碳点。整个过程中仅使用水作为绿色溶剂,无需高毒性的化学试剂或

强腐蚀性酸,反应条件温和、能耗低,且不产生有害副产物。所获得 TCM-CDs 具有良好的生物相容性和低毒性,进一步降低了环境负荷与后续应用风险,不仅实现了废弃生物质资源的高附加值转化,也符合绿色化学中减少废弃物、使用安全试剂与可再生原料的原则,是一种环境可持续的纳米材料制备途径。不同碳点制备方法对比见表 1。

表 1 3 种碳点制备方法的综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of three carbon dot preparation methods

合成方法	核心优势(独特性)	技术瓶颈(独特性)	量子产率	原料适应性
水热法	保留羟基/羧基,无需额外钝化,生物相容性优	制备周期长,量子产率波动大	15%~35%	适配性广,尤其适合根茎类(多糖/皂苷)、叶类(黄酮/酚类)中药
高温热解法	无溶剂,效率高,易规模化	热敏成分降解,量子产率低	8%~20%	适合木质化中药、中药药渣等耐高热原料
微波辐照法	反应快(数分钟),粒径分布窄	温度控制精度要求高,批次一致性差	12%~30%	优先适配含极性分子的中药(如含多糖、黄酮的叶类/花类中药),微波对极性分子加热效率高

鉴于 TCM-CDs 的粒径、表面官能团及药理活性高度依赖制备方法,需结合特定应用目标理性选择并优化合成方法。

1.2 表征分类

深入理解 TCM-CDs 理化性质与抗菌活性的构效关系,需通过多种技术精准表征其粒径分布、形貌、聚集状态及表面电荷等参数^[30]。核心表征手段包括结构表征与光学表征 2 类。

1.2.1 结构表征 透射电子显微镜是表征 TCM-CDs 粒径、形貌及晶体结构的直接手段。研究证实,TCM-CDs 通常呈现为粒径小于 10 nm 的类球形颗粒,分散性良好,无明显团聚现象。这种纳米尺度特性赋予其在抗菌过程中的关键优势:(1)显著增强其在细菌细胞壁的吸附能力,甚至促进其穿透细胞膜屏障,直接破坏膜结构完整性;(2)超高的比表面积提供了大量潜在的细菌细胞表面相互作用位点。X 射线光电子能谱是解析 TCM-CDs 元素组成(如 C、O、N 等)及表面官能团(如富有的-COOH、-NH、-OH 等亲水性基团)的核心技术。这些亲水性基团不仅是维持 TCM-CDs 在水相及生理环境中稳定分散的关键^[38],其表面电荷特性更直接关联抗菌机制。如氨基(-NH₂)可赋予 TCM-CDs 正电性,使其在生理 pH 环境下(此时细菌细胞膜通常带负电荷)^[39]通过强静电引力高效吸附于细菌表面,这种初始吸附是后续膜破坏的关键步骤。因此,系统解析 TCM-CDs 的元素组成、化学键及表面官能团的种类与丰度是理解其性能的基础。

1.2.2 光学表征 紫外-可见吸收光谱(ultraviolet-

visible spectrum, UV-Vis)与荧光光谱是表征 TCM-CDs 光学性质的主要技术手段。UV-Vis 分析普遍显示 TCM-CDs 在紫外短波长区(如 200~300 nm)存在强吸收峰,并常延伸至可见光区域。该吸收特性主要源于碳核 sp²共轭结构的 π-π 电子跃迁^[40],这一特性赋予了 TCM-CDs 显著的光动力抗菌潜力,在适宜波长光激发下,其可高效产生活性氧,进而发挥抑菌或杀菌效应^[41]。TCM-CDs 的荧光特性则主要受其核心 sp²域尺寸及富含杂原子(如 N、O)的表面官能团共同调控^[42]。值得注意的是,由于粒子尺寸分布不均及表面发光位点的异质性,TCM-CDs 常呈现激发波长依赖的发射行为。利用其荧光特性进行生物成像,可直接观测 TCM-CDs 在细菌细胞内的空间分布。如细胞内均匀分散的强荧光信号,可作为 TCM-CDs 成功穿透细菌细胞膜屏障的直接可视化证据^[43],为深入阐明其跨膜转运过程及抗菌作用机制提供了关键依据。

综上,对 TCM-CDs 理化性质的系统表征是解析其抗菌分子机制不可或缺的基础,也为通过理性设计(如精准调控粒径、表面电荷分布、官能团密度或光学响应性)优化其抗菌效能提供了坚实的理论支撑。深入理解并精准调控这些核心性质参数,对于开发新一代高效、安全的抗菌纳米材料具有决定性意义。

2 TCM-CDs 在抗菌领域的应用及其作用机制研究

TCM-CDs 因其独特的多机制协同抗菌特性,成为解决耐药菌感染极具前景的候选者。区别于传统抗菌药物的单靶点作用模式,TCM-CDs 主要通

过物理损伤（如膜破坏）与化学干扰（如诱导氧化应激）的协同效应抑制病原菌生长，如图1所示。

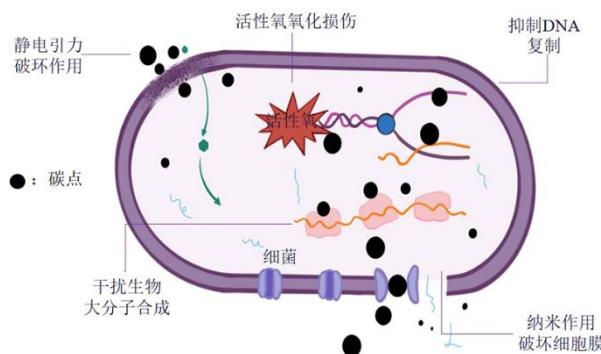


图1 TCM-CDs的抑菌机制
Fig. 1 Antibacterial mechanism of TCM-CDs

2.1 TCM-CDs的抗菌活性与应用实例

中药凭借其多成分、多靶点、多通路的综合作用机制在抗菌领域备受关注。然而，部分抗菌活性成分仍受限于水溶性差、化学稳定性弱及口服生物利用度低等问题^[44]，将此类活性成分转化为纳米尺度的TCM-CDs，可有效突破其固有药动学屏障，显著提升药物递送效率与靶向性，已成为克服上述应用瓶颈、增强抗菌效能的创新策略。研究证实，多种TCM-CDs表现出广谱抗菌活性，对革兰阳性菌（如金黄色葡萄球菌）和革兰阴性菌（如大肠埃希菌）均具有显著抑制效果^[45-47]，这些优异的抗菌性能源于中药固有活性分子与碳点独特纳米效应的协同增效作用。

目前，多种单味中药、复方成分及中药加工副产物已被成功用作碳源，合成出具有抗菌活性的TCM-CDs，代表性研究见表2。

根据以上研究表明，不同中药来源的TCM-CDs抑菌活性不同，白附子、蛇床子及大蒜衍生碳点的抗菌效果较为突出。这一差异主要归因于原料活性成分（如白附子生物碱、大蒜素）的固有特性及合成工艺参数的协同作用。基于上述特性，TCM-CDs在伤口感染治疗^[46,59]、食品保鲜防腐^[60]及医疗器械抗菌涂层^[56]等领域展现出应用潜力。

2.2 TCM-CDs的抗菌作用机制

2.2.1 基于物理化学相互作用的膜破坏 细菌细胞壁-膜复合体是抵御外界威胁的首道屏障，其结构完整性对细菌生存至关重要。TCM-CDs凭借其超小尺寸和优异的水溶性，可有效渗透并嵌入膜脂质双分子层，形成纳米级孔道。该过程触发胞内关键

酶、离子及其他小分子物质持续外泄，最终导致细菌因渗透压崩溃而溶解。此外，TCM-CDs可通过强静电引力引发膜电位去极化，扰乱磷脂双分子层的紧密排列，导致膜结构物理性崩解、胞内物质大量泄漏，最终致使细菌死亡^[50]。

2.2.2 细胞内生物大分子干扰与代谢抑制 穿透物理屏障后，TCM-CDs可深入细菌胞内，通过以下核心机制干扰其关键代谢途径：（1）诱导氧化应激，TCM-CDs可通过干扰跨膜蛋白的正常生理功能，从而干扰膜间呼吸链的电子传递，导致细胞内活性氧大量积累。活性氧的生成包含单线态氧、超氧基和羟基，它们可同时攻击胞外膜结构与胞内关键组分（如DNA、蛋白质），通过不可逆氧化损伤引发细菌死亡^[61]。（2）抑制蛋白质合成与功能，TCM-CDs能直接结合并破坏多种功能蛋白（如核糖体蛋白、结构蛋白、分泌蛋白）的空间构象^[62-63]，显著干扰其生物合成与正常生理功能。鉴于蛋白质是细菌生命活动的执行者，其功能失调必然导致细菌活性急剧下降乃至死亡。此外，TCM-CDs可特异性靶向并改变关键酶[如N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶（N-acetyl- β -D-glucosaminidase，NAG）]的二级结构，强烈抑制其催化活性^[64]。由于NAG是催化细菌外膜核心组分脂质A生物合成的必需含锌金属酶，其活性抑制将直接破坏外膜结构的完整性。（3）影响遗传物质的复制，郑晓丹^[50]通过qRT-PCR检测基因表达发现，在TCM-CDs作用细菌后，调控细菌细胞DNA复制的DNA多聚酶基因I的表达受到显著抑制，表明TCM-CDs通过抑制DNA复制从而达到抑菌的作用。

2.2.3 光激活增强机制 光动力疗法 (photodynamic therapy, PDT) 依靠特定波长光激发TCM-CDs（作为光敏剂）可原位产生活性氧，通过氧化损伤杀灭细菌^[65]。光热疗法 (photothermal therapy, PTT) 是光激发诱导TCM-CDs产生局部高温，通过多重热效应（如膜脂质熔化、蛋白/酶不可逆变性、胞内空泡化及胞质蒸发）实现高效灭菌^[66]。单一PTT易因局部温度失控损伤正常组织^[67]，而单一PDT则需高剂量活性氧实现有效灭菌，过量活性氧可引发正常细胞炎症反应、纤维化及坏死^[68]。因此，PDT与PTT的协同作用展现出独特价值，温和热效应可显著降低细菌代谢活性并增强细胞膜通透性，从而极大提升细菌对PDT产生活性氧的敏感性，最终实现低剂量、高效率的协同杀菌^[69]。鄢宏

表 2 中药衍生碳点在抗菌领域的应用及其作用机制

Table 2 Application and mechanism of action of traditional Chinese medicine derived carbon dots in antibacterial field

中药	制备方法	目标病原菌	抗菌结果	抗菌机制及其应用	文献
绿茶	水热法 160 °C、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌 12 h	660 nm 光照下 $100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	通过产生活性氧, 达到促进伤口愈合效果	48	
大蒜	水热法 210 °C、大肠埃希菌、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、耐多药伤寒沙门氏菌 4 h	MIC 分别为 50、25、75 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	通过破坏细胞壁和细胞膜完整性、产生活性氧及抑制细菌生物膜的形成, 实现抗菌作用, 用于促进伤口愈合治疗	49	
天麻	水热法 180 °C、大肠埃希菌、铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌 12 h	MIC 分别为 50.0、12.5、25.0、12.5 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	利用破坏细胞膜完整性、抑制 DNA 聚合酶及抑制糖代谢达到抗菌效果, 用于抗菌机制研究	50	
白附子	溶剂(丙酮)热法 120 °C、5 h	MIC 分别为 8、62 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	利用破坏细胞膜完整性的特性实现抗菌作用, 用于抗菌机制研究	51	
姜黄	水热法 180 °C、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肺炎克雷伯菌和表皮葡萄球菌 10 h	MIC 分别为 250、250、500、500 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	通过破坏细胞膜完整性及产生活性氧达到抗菌作用, 用于开发新的抗菌剂	52	
甘草	水热法 180 °C、金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌、沙门氏菌、铜绿假单胞菌 8 h	MIC 分别为 200、160、200、160 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	通过破坏细胞膜完整性达到抗菌作用, 用于抗菌机制研究	53	
山竹壳	水热法 200 °C、大肠埃希菌 O157: H7、金黄色葡萄球菌 6 h	研究膜对金黄色葡萄球菌的抑菌圈大于大肠杆菌的抑菌圈	利用破坏细胞壁和细胞膜完整性及产生活性氧达成抗菌效果, 延长食品的货架期	54	
洋葱	水热法 200 °C、脆弱假单胞菌 8 h	MIC 为 2 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	通过破坏细胞壁和细胞膜完整性、产生活性氧及影响蛋白质合成实现抗菌效果, 达到延长食品货架期的作用	55	
厚朴	溶剂(无水乙醇)热法 180 °C、8 h	TCM-CDs 100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	破坏细胞膜完整性及产生活性氧的抗菌特性对大肠杆菌和变形链球菌的抗菌率均在 70% 以上	56	
蛇床子	水热法 160 °C、金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌 4 h	MIC 分别为 50、100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	破坏细胞膜完整性	57	
艾叶	水热法 180 °C、金黄色葡萄球菌 10 h	MIC 为 1 250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	破坏细胞壁及改变细胞膜通透性	25	
蒲公英	水热法 150 °C、大肠埃希菌 4 h	MIC 为 1 600 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	破坏细胞膜完整性	58	
黄连	水热法 160 °C、大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌 10 h	MIC 分别为 3 200、3 200 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	破坏细胞膜完整性	58	

MIC-最低抑菌浓度。

MIC-minimum inhibitory concentration.

俊^[70]通过 PDT 联合 PTT 的抗菌性能测试表明 TCM-CDs 具备将近红外光能转化为热能的能力, 相对于单独的 PDT 治疗, 局部加热会改变细菌外膜通透性, 促进活性氧向细菌内部扩散, 进一步破坏细胞内的稳态, 达到双模式协同高效抗菌的效果。

2.2.4 生物膜调控机制 细菌生物膜由胞外聚合物基质 (extracellular polymeric substances, EPS) [含蛋白质、多糖、胞外 DNA (eDNA)] 构成的致密、疏水且带负电的物理屏障, 极大阻碍了抗菌剂的渗透, 导致细菌耐药性显著提升, 造成慢性、难治性感染。因此, 靶向生物膜调控是攻克此类感染的关

键。王子锐^[49]通过结晶紫染色评价大蒜衍生碳点的抗生物膜性能, 当 TCM-CDs 质量浓度达到 1 600 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌生物膜的抑制率为 91.78%。TCM-CDs 可通过多种机制抑制细菌生物膜的形成并清除已形成的生物膜。其抑制形成作用主要涉及下调细菌黏附基因表达、抑制群体感应相关基因^[71-73]及通过杀菌效应减少细菌定植数量^[74]。对于已存在的生物膜, TCM-CDs 则凭借其小尺寸优势渗透至生物膜深层进行直接破坏^[75], 同时, 其产生的活性氧可降低 EPS 中胞外 eDNA 的水平, 并通过干扰淀粉样蛋白功能, 共同介导对成熟

生物膜的清除^[75]。

3 TCM-CDs 的抗菌应用前景

3.1 生物医学领域

3.1.1 局部抗菌与伤口愈合 TCM-CDs 的小尺寸、表面电荷和活性氧生成能力, 赋予其高效抗菌活性, 基于 TCM-CDs 的复合水凝胶无需掺杂金属离子或抗菌药物, 即能兼具优异的生物相容性、广谱抗菌活性及较低制备成本, 是极具前景的智能伤口敷料材料, 尤其适用于各类急慢性皮肤创面管理^[76]。更重要的是, TCM-CDs 在创伤修复中具有“抗感染-抗炎”双重调控优势: 一方面通过活性氧高效杀灭病原菌; 另一方面有效清除创面过量自由基, 减轻氧化应激损伤, 协同促进组织再生与愈合进程^[77]。如 Zhang 等^[78]开发的亚麻籽源 TCM-CDs 材料, 在动物急性伤口模型中显著加速愈合, 第 10 天愈合率即达 92%, 展现出明确的临床转化价值。

3.1.2 医疗器械抗感染涂层 致病菌在医疗器械表面定植形成生物膜, 是引发器械相关感染和临床耐药性难题的核心因素。针对此挑战, TCM-CDs 因其在抑制耐药菌生物膜形成方面表现出的突出活性, 成为开发新型长效抗菌涂层的理想材料^[79]。如王一席^[56]开发的聚多巴胺-和厚朴酚碳点涂层技术, 该涂层在口腔正畸托槽表面构建了稳定的抗菌界面, 经长达 7 d 的连续浸泡实验仍保持显著抑菌效果, 为心血管支架、导管等介入性医疗器械的抗感染表面改性提供了创新解决方案。

3.1.3 系统性感染治疗的探索 口腔微生态失衡会导致致病菌过度增殖、生物膜形成及组织侵袭。若不及时干预, 极易造成不可逆的牙体或牙周组织损伤。薛坤^[80]利用羌活制备碳点并建立了大鼠牙周炎模型, 以此探究 TCM-CDs 对牙周炎的治疗效果。研究发现, TCM-CDs 能够抑制病原菌生长并减少炎症介质释放, 从而减轻牙周组织损伤, 实现治疗牙周炎的目的。该研究为开发口腔感染治疗药物提供了新思路。

3.2 食品保鲜与包装领域的应用

尽管石油基塑料凭借优异的理化与加工性能在食品包装中占据主导地位^[81], 但其不可降解性及石油资源依赖加速了可生物降解材料的替代需求^[82]。TCM-CDs 因其高生物相容性、低毒性、良好生物降解性、可再生性及极低的迁移风险^[83], 成为极具发展潜力的功能性包装添加剂。TCM-CDs 不仅具有抗氧化和抗菌活性, 其光致发光特性还可作为内置

传感器, 实时追踪包装环境参数(酸碱度、湿度、O₂/CO₂水平、微生物丰度)^[84-85], 推动智能食品包装的发展。

4 TCM-CDs 临床应用的核心挑战

4.1 规模化制备、标准化控制与成本优化

当前 TCM-CDs 的主流合成策略(如水热法、微波法)仍主要受限于实验室规模, 普遍面临生产效率低、批次重复性差及成本高昂等瓶颈, 严重制约其规模化生产进程。TCM-CDs 区别于常规 CDs 的核心价值在于其源于中药活性分子的独特治疗潜力与光学特性。然而, 这些关键性质(尤其是荧光量子产率、活性氧生成效率及抗菌效能)高度依赖于原料药材的活性成分谱(指纹图谱)及其稳定性及具体的合成工艺参数(温度、时间、pH 等)。这种复杂的“源-效”关系对实现 TCM-CDs 的标准化、均一化生产构成了严峻挑战。另外对于成本优化值得探索的方向是利用中药制药废弃物等低成本、可持续碳源, 以显著降低原材料成本并促进资源循环利用。

4.2 系统性与前瞻性的安全评估

尽管 TCM-CDs 在纳米医学中前景广阔, 其潜在的生物相互作用风险不容忽视。现有安全性评价多聚焦于体外模型(如溶血实验、细胞毒性)^[42,86], 但日益增多的证据表明^[87], 高剂量 TCM-CDs 或光激活状态下的 TCM-CDs 对植物乃至真核细胞均可能诱导剂量相关性毒性。TCM-CDs 的小尺寸与高比表面积特性使其易于被免疫系统识别捕获, 可能导致快速清除、诱发炎症反应; 长期体内滞留则存在潜在有害物质缓释风险, 威胁细胞与器官能^[88]。Liu 等^[89]利用斑马鱼胚胎模型证实: 低质量浓度 TCM-CDs (<200 μg/mL) 未表现胚胎毒性, 但质量浓度>200 μg/mL 时显著诱发发育畸形; 更高浓度暴露还观察到多巴胺水平下降, 提示潜在神经毒性。因此, 急需建立更贴近人体的复杂动物模型及先进的检测技术, 开展长期、系统的毒理学研究(涵盖急/慢性毒性、生殖毒性、神经毒性、免疫毒性及环境毒性), 为临床安全应用提供坚实的科学依据。系统性、前瞻性的风险评估是平衡 TCM-CDs 巨大应用潜力与其潜在危害的核心前提。

4.3 作用机制与构效关系的深度解析

TCM-CDs 的抗菌活性源于双重协同: 中药活性成分的固有抗菌特性叠加纳米结构特性介导的物理化学损伤, 有望实现低剂量高效抑菌。然而,

目前对 TCM-CDs 抑菌机制的认识主要基于体外细胞和动物实验, 其在分子层面的作用靶点与信号通路等机制仍有待阐明。值得注意的是, 上述 TCM-CDs 的抗菌机制作用也可能对宿主正常细胞产生潜在毒性。此外, TCM-CDs 在体内的药动学特性(如生物分布、代谢清除等)尚未建立完整的数据库。未来研究需重点解决以下问题: 如何精确调控其抗菌活性以实现选择性(即靶向细菌而对宿主细胞损伤最小化)及如何建立明确的剂量-效应关系以确保其有效抗菌的同时保护机体安全。

4.4 法规与知识产权路径

TCM-CDs 的临床转化面临多重挑战, (1) 法规层面存在适配困境, 由于其兼具天然药物与合成纳米材料双重特性, 现行药品分类体系难以明确界定, 同时体内代谢数据缺失严重阻碍安全性评价进程; (2) 知识产权保护呈现复杂性, 多靶点作用机制导致专利技术特征描述困难, 使用道地药材作原料时, 传统保密要求与专利公开原则易产生矛盾; (3) 国际竞争上, 国外在纳米医药专利布局严密, 急需提交国际专利抢占技术空白点, 并建立“来源披露”机制保护传统中药知识。要解决以上问题, 需协同改进法规与专利制度: 通过制定纳米中药分类标准、完善体内代谢数据库建设, 并推动跨国数据共享和专利快速审批机制, 以实现临床转化目标。

5 结语

TCM-CDs 通过整合天然产物的生物活性与纳米材料的独特性能, 开创了“纳米中药”研究新模式。其在抗菌领域展现出三大核心优势: 广谱抗菌性、抗氧化协同性和生物降解性。然而, 临床转化需突破“制备-机制-安全”三重技术壁垒。未来研究应聚焦开发定向功能修饰技术增强靶向抗菌效率、结合人工智能技术优化中药材前驱体的筛选及推动多学科交叉的临床转化研究等, 加速从实验室到临床的应用进程。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 赵莉娜, 李金漪, 李亚芳, 等. 我国抗菌药物管理现状、问题与发展策略 [J]. 中国感染控制杂志, 2025, 24(1): 6-14.
- [2] 黄倩倩, 吴成圆, 滕云峰, 等. 中药衍生碳点研究进展 [J]. 中草药, 2021, 52(16): 5089-5097.
- [3] Tian S C, Hu Z L, Zhang W D. Modernization of charcoal drugs: Integrating research paradigms of carbon dots to gain new perspectives [J]. *Chin Herb Med*, 2025, 17(2): 292-295.
- [4] 夏岚, 张远华, 付琦峰. 绿色来源荧光碳点的合成及应用进展 [J]. 西南医科大学学报, 2023, 46(5): 450-455.
- [5] Zeng M T, Wang Y, Liu M Z, et al. Potential efficacy of herbal medicine-derived carbon dots in the treatment of diseases: From mechanism to clinic [J]. *Int J Nanomedicine*, 2023, 18: 6503-6525.
- [6] Zhang J W, Hou Y, Xu X S, et al. *Gardeniae Fructus* derived natural small molecule-based carbon dots promoting activation and aggregation of platelets to accelerate hemostasis [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2025, 251: 114601.
- [7] Liang P, Bi T, Zhou Y N, et al. Carbonized *Platycladus orientalis* derived carbon dots accelerate hemostasis through activation of platelets and coagulation pathways [J]. *Small*, 2023, 19(49): e2303498.
- [8] Liu Y H, Zhang M L, Cheng J J, et al. Novel carbon dots derived from *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma* and their anti-gastric ulcer effect [J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 1512.
- [9] Wu T, Bai X, Zhang Y, et al. Natural medicines-derived carbon dots as novel oral antioxidant administration strategy for ulcerative colitis therapy [J]. *J Nanobiotechnol*, 2024, 22(1): 511.
- [10] Mou Y F, Bai X, Ma H G, et al. Protective effect of carbon dots derived from scrambled *Coptidis Rhizoma* against ulcerative colitis in mice [J]. *Front Mol Biosci*, 2023, 10: 1253195.
- [11] Dong L Y, Zhao Y F, Luo J, et al. Carbon dots derived from *Curcumae Radix* and their heartprotective effect [J]. *Int J Nanomedicine*, 2024, 19: 3315-3332.
- [12] Dong L Y, Li M H, Cao T Y, et al. Protective effect of carbon dots derived from *Salvia miltiorrhiza* pretreatment in acute myocardial infarction in rats [J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(3): 242.
- [13] Chen Y M, Xiong W, Zhang Y, et al. Carbon dots derived from *Os draconis* and their anxiolytic effect [J]. *Int J Nanomedicine*, 2022, 17: 4975-4988.
- [14] Li X P, Dai E T, Li M H, et al. *Aurantii Fructus Immaturus* carbonisata-derived carbon dots and their anti-depression effect [J]. *Front Mol Biosci*, 2024, 10: 1334083.
- [15] Jia M M, Yi B C, Chen X, et al. Carbon dots induce pathological damage to the intestine via causing intestinal flora dysbiosis and intestinal inflammation [J]. *J Nanobiotechnol*, 2023, 21(1): 167.
- [16] Bian Z R, Bao T Z, Sun X Q, et al. Machine learning tools to assist the synthesis of antibacterial carbon dots [J]. *Int J Nanomedicine*, 2024, 19: 5213-5226.
- [17] Yan H J, Zhang B Q, Zhang Y, et al. Fluorescent carbon

- dot-curcumin nanocomposites for remarkable antibacterial activity with synergistic photodynamic and photothermal abilities [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2021, 4(9): 6703-6718.
- [18] 崔开宇. 痰热清注射液及其有效成分协同抗生素抑制耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的机制研究 [D]. 北京: 中国中医科学院, 2023.
- [19] 周意, 李秋明, 龙华婧, 等. 黄芩颗粒与抗菌药联合使用对诺卡菌的体外抑菌效果 [J]. 实用检验医师杂志, 2022, 14(2): 191-194.
- [20] Zhang S P, Hu B, Xu J F, et al. Baicalin suppress growth and virulence-related factors of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in vitro and vivo [J]. *Microb Pathog*, 2020, 139: 103899.
- [21] Ai S N, Li Y K, Zheng H J, et al. Collision of herbal medicine and nanotechnology: A bibliometric analysis of herbal nanoparticles from 2004 to 2023 [J]. *J Nanobiotechnology*, 2024, 22(1): 140.
- [22] Zhang J W, Zou L J, Li Q L, et al. Carbon dots derived from traditional Chinese medicines with bioactivities: A rising star in clinical treatment [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2023, 6(10): 3984-4001.
- [23] Wu Y Y, Li C, van der Mei H C, et al. Carbon quantum dots derived from different carbon sources for antibacterial applications [J]. *Antibiotics*, 2021, 10(6): 623.
- [24] Chen Q Y, Liu S, Wang Y H, et al. Yam carbon dots promote bone defect repair by modulating histone demethylase 4B [J]. *Int J Nanomedicine*, 2024, 19: 10415-10434.
- [25] 李琼洋. 艾叶碳量子点的制备及其抗菌和抗氧化活性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [26] 马颖颖. 框子和连翘药渣碳点的制备、性质和生物活性的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [27] 张涛, 施冲煜, 王青平, 等. 中药衍生碳点的制备、表征方法及其药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2025, 56(6): 2224-2237.
- [28] 何静, 陈佳, 邱洪灯. 中药碳点的合成及其在生物成像和医学治疗方面的应用 [J]. 化学进展, 2023, 35(5): 655-682.
- [29] Shang J J, Zhou Q, Wang K H, et al. Engineering of green carbon dots for biomedical and biotechnological applications [J]. *Molecules*, 2024, 29(18): 4508.
- [30] Paveethra S, Manisekaran H, Sasidharan S. Medicinal plants derived green carbon dots: Synthesis, characterization and their potential applications in cancer therapy [J]. *Asian Pac J Cancer Prev*, 2024, 25(10): 3393-3411.
- [31] Ren J K, Opoku H, Tang S, et al. Carbon dots: A review with focus on sustainability [J]. *Adv Sci*, 2024, 11(35): e2405472.
- [32] Humaera N A, Fahri A N, Armynah B, et al. Natural source of carbon dots from part of a plant and its applications: A review [J]. *Luminescence*, 2021, 36(6): 1354-1364.
- [33] Luo W K, Zhang L L, Yang Z Y, et al. Herbal medicine derived carbon dots: Synthesis and applications in therapeutics, bioimaging and sensing [J]. *J Nanobiotechnology*, 2021, 19(1): 320.
- [34] Guo S S, Zhang R, Liu Y Y, et al. Synthesis, applications in therapeutics, and bioimaging of traditional Chinese medicine-derived carbon dots [J]. *Carbon Lett*, 2024, 34(2): 545-564.
- [35] 胡妙言, 刘凯, 高诗雨, 等. 淡竹叶碳量子点的微波法制备及在细胞成像中的应用探究 [J]. 发光学报, 2022, 43(12): 2001-2013.
- [36] Tsai H W, Tampubolon N F, Wu T, et al. Characterization of carbon dots from *Fructus Gardeniae* (Zhi-zi) and *Gardenia charcoal* (black Zhi-zi) via microwave-assisted extraction [J]. *J Food Drug Anal*, 2024, 32(3): 371-381.
- [37] 方福玲. 碳量子点制备与抗菌性能研究及其感染性骨缺损治疗应用 [D]. 上海: 上海大学, 2021.
- [38] 程朝歌. 生物质纤维素基碳量子点的功能化制备及应用研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
- [39] 李培礼. 抗菌碳点及其复合体系的构建与抗生物膜应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [40] 张雅晴. 山西道地药材碳量子点制备及应用 [D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [41] 安玉龙, 刘灿, 徐开蒙, 等. 生物质碳点荧光材料在生物医药领域中的应用 [J]. 材料导报, 2022, 36(22): 209-220.
- [42] 黄倩倩. 茜草多糖衍生碳点的制备、表征及其在离子检测和细胞动力学研究 [D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2021.
- [43] 崔方超. 多色碳量子点的功能化制备及其在生物成像、食源性致病菌检测及抗菌中的应用 [D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [44] 陈晨, 李永圆, 王海霞, 等. 制剂技术在提高中药抗菌活性方面的应用及前景分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(7): 247-253.
- [45] Wu L N, Gao Y R, Zhao C F, et al. Synthesis of curcumin-quaternized carbon quantum dots with enhanced broad-spectrum antibacterial activity for promoting infected wound healing [J]. *Biomater Adv*, 2022, 133: 112608.
- [46] Feng R M, Tian F, Zhou J, et al. A preliminary study on the promotion of wound healing by paeoniflorin carbon dots loaded in chitosan hydrogel [J]. *Biomed Mater*, 2025, doi: 10.1088/1748-605X/add2ba.

- [47] Chen S Q, Li Y F, Guo X W, et al. Mulberry leaves-derived carbon dots for photodynamic treatment of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*-infected wounds via metabolic perturbation [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17(12): 18741-18758.
- [48] 张云秀, 贾庆岩, 葛介超. 绿茶衍生碳点用于光动力治疗耐药菌感染 [J]. *发光学报*, 2023, 44(6): 1112-1120.
- [49] 王子悦. 基于大蒜的生物质基碳点的制备及其抗菌机理和应用研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [50] 郑晓丹. 三种云南道地药材碳点的制备及其性质研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [51] Shi W F, Li J H, Pu J M, et al. *Epigynum auritum*-derived near-infrared carbon dots for bioimaging and antimicrobial applications [J]. *Molecules*, 2025, 30(2): 422.
- [52] Saravanan A, Maruthapandi M, Das P, et al. Green synthesis of multifunctional carbon dots with antibacterial activities [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 369.
- [53] 周莉佳, 杨金华, 池玉婷, 等. 荧光碳点的合成及抗菌活性 [J]. *化学研究与应用*, 2022, 34(10): 2525-2530.
- [54] 谢德浪. 基于 ZnO 改性的山竹壳碳点的活性包装膜的构建及其羊杂预制菜保鲜研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [55] 林蓉. 洋葱源碳点对大西洋鲭鱼特定腐败菌抑制效应及保鲜研究 [D]. 大连: 大连工业大学, 2022.
- [56] 王一席. 利用载抗菌性碳点聚多巴胺涂层修饰口腔正畸托槽的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [57] 王新然. 中草药衍生碳点的制备及其在离子检测和抗菌方面的应用 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2024.
- [58] 刘健宇. 抑菌性荧光碳点的制备与功能验证 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [59] 祁瑾, 李冰, 杜仲衍生抗菌碳点及其复合水凝胶的制备及促进伤口愈合的研究 [A] // 第十七次全国口腔材料学术年会论文摘要集 [C]. 杭州: 第十七次全国口腔材料学术年会, 2023: 230-231.
- [60] 杜鹃. 碳量子点介导的光动力对采后鲜果枸杞保鲜作用及其机制研究 [D]. 银川: 北方民族大学, 2024.
- [61] 余博. 姜黄碳点对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的杀菌效应及机制研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- [62] Zhao D, Zhang R, Liu X M, et al. Screening of chitosan derivatives-carbon dots based on antibacterial activity and application in anti- *Staphylococcus aureus* biofilm [J]. *Int J Nanomedicine*, 2022, 17: 937-952.
- [63] Qie X W, Zan M H, Gui P, et al. Design, synthesis, and application of carbon dots with synergistic antibacterial activity [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 894100.
- [64] 林健, 李智欢, 吴志红. 碳量子点黄芩素复合物对金黄色葡萄球菌抑菌作用的研究 [J]. 九江学院学报: 自然科学版, 2022, 37(2): 92-97.
- [65] Jakubczyk K, Dec K, Kałduńska J, et al. Reactive oxygen species - sources, functions, oxidative damage [J]. *Pol Merkur Lekarski*, 2020, 48(284): 124-127.
- [66] Liu Y S, Wei X, Zhao X, et al. Near-infrared photothermal/photodynamic-in-one agents integrated with a guanidinium-based covalent organic framework for intelligent targeted imaging-guided precision chemo/PTT/PDT sterilization [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(24): 27895-27903.
- [67] Yun W S, Park J H, Lim D K, et al. How did conventional nanoparticle-mediated photothermal therapy become "hot" in combination with cancer immunotherapy? [J]. *Cancers*, 2022, 14(8): 2044.
- [68] Zhang Y Q, Fang J, Ye S Y, et al. A hydrogen sulphide-responsive and depleting nanoplatform for cancer photodynamic therapy [J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 1685.
- [69] Wang S S, Wang D P, Wang G L, et al. Antibacterial carbon dots [J]. *Mater Today Bio*, 2025, 30: 101383.
- [70] 鄢宏俊. 基于姜黄素的中药纳米碳点复合体系制备及其光照抗菌活性研究 [D]. 南宁: 广西中医药大学, 2022.
- [71] Ciofu O, Moser C, Jensen P Ø, et al. Tolerance and resistance of microbial biofilms [J]. *Nat Rev Microbiol*, 2022, 20(10): 621-635.
- [72] Tian S, Su L Z, Liu Y, et al. Self-targeting, zwitterionic micellar dispersants enhance antibiotic killing of infectious biofilms-An intravital imaging study in mice [J]. *Sci Adv*, 2020, 6(33): eabb1112.
- [73] 华建豪. 可调多色发光碳点的制备及其生物应用研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [74] Otis G, Bhattacharya S, Malka O, et al. Selective labeling and growth inhibition of *Pseudomonas aeruginosa* by aminoguanidine carbon dots [J]. *ACS Infect Dis*, 2019, 5(2): 292-302.
- [75] Yu M Z, Li P L, Huang R B, et al. Antibacterial and antibiofilm mechanisms of carbon dots: A review [J]. *J Mater Chem B*, 2023, 11(4): 734-754.
- [76] Mou C J, Wang X Y, Liu Y C, et al. A robust carbon dot-based antibacterial CDs-PVA film as a wound dressing for antibiosis and wound healing [J]. *J Mater Chem B*, 2023, 11(9): 1940-1947.
- [77] Wang H G, Sun S, Zhao Y, et al. Carbon dots with integrated photothermal antibacterial and heat-enhanced antioxidant properties for diabetic wound healing [J]. *Small*, 2024, 20(45): e2403160.
- [78] Zhang Y, Wang R N, Fan H Y, et al. Carbon dots from *Camelina* decorating hFGF2-linked *Camelina* lipid droplets cooperate to accelerate wound healing [J]. *ACS*

- Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(29): 34451-34461.
- [79] Priyadarshini E, Kumar R, Balakrishnan K, et al. Biofilm inhibition on medical devices and implants using carbon dots: An updated review [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2024, 7(5): 2604-2619.
- [80] 薛坤. 羌活醇碳点及羌活碳点对牙周炎症的抑制作用及机制探究 [A] // 中华口腔医学会口腔生物医学专业委员会第14次口腔生物医学学术年会中华口腔医学会口腔病理学专业委员会第18次口腔病理学术年会论文集 [C]. 昆明: 中华口腔医学会, 2024: 350.
- [81] Zhang J, Xu W R, Zhang Y C, et al. *In situ* generated silica reinforced polyvinyl alcohol/liquefied chitin biodegradable films for food packaging [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 238: 116182.
- [82] Van Nguyen S, Lee B K. Polyvinyl alcohol/cellulose nanocrystals/alkyl ketene dimer nanocomposite as a novel biodegradable food packing material [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 207: 31-39.
- [83] 原晓喻, 冯静园, 葛贝宁, 等. 纳米复合食品接触材料研究进展 [J]. 包装工程, 2023, 44(17): 66-76.
- [84] 何松杰, 张清梅, 张路鹏, 等. pH 响应型碳点的荧光机制和生物医学应用 [J]. 发光学报, 2022, 43(1): 137-151.
- [85] Zhu H, Li J, Cheng J H. Designing cellulose nanofibrils/carbon dots intelligent label with colorimetric and fluorescent dual responsiveness for real-time monitoring of food freshness [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 271(Pt 2): 132642.
- [86] 程怀毅. 白藜芦醇碳点的制备及对炎症状态下的骨缺损及软组织修复的研究 [D]. 太原: 山西医科大学, 2024.
- [87] 李瑾瑶. 煤基碳点纳米材料生物毒性研究 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2022.
- [88] 赵晨彤, 陈静怡, 张伟娜, 等. 纳米级药物载体的制备及其抗癌、抗菌应用新进展 [J]. 化学通报: 中英文, 2025, 88(4): 354-368.
- [89] Liu W, Huang G, Su X Y, et al. Zebrafish: A promising model for evaluating the toxicity of carbon dot-based nanomaterials [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(43): 49012-49020.

[责任编辑 赵慧亮]