

纳米纤维素在药物缓释中的应用

邓奕慧, 韦正*, 李杭烨, 汤圣奎

广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室, 广西现代蚕桑丝绸协同创新中心, 微生物及植物资源开发利用广西高校重点实验室, 河池学院化学与生物工程学院, 广西 河池

收稿日期: 2025年8月2日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月4日

摘要

纳米纤维素作为一种新型生物材料, 具有较好的生物相容特性、较高的表面积与体积比、易降解及环保等属性。近年来在药物缓释研究中, 其可用作药物载体, 引起了学者的广泛关注。本文阐述了纳米纤维素的不同种类与性质, 生产的方法, 探讨了纳米纤维素的药物载体性能、释放机制, 并对当前纳米纤维素及其复合材料在药物缓释领域的研究成果进行了综述。通过对现有文献的分析, 旨在为纳米纤维素的深入研究提供参考, 为推动纳米纤维素在药物传递领域的发展提供依据。

关键词

纳米纤维素, 药物缓释, 生物材料, 药物传递, 应用

Application of Nanocellulose in Sustained Drug Release

Yihui Deng, Zheng Wei*, Hangye Li, Shengkui Tang

Guangxi Key Laboratory of Sericulture Ecology and Applied Intelligent Technology, Guangxi Collaborative Innovation Center of Modern Sericulture and Silk, Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Microbial and Botanical Resources, School of Chemistry and Bioengineering, Hechi University, Hechi Guangxi

Received: Aug. 2nd, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

As a new type of biological material, nanocellulose has good biocompatibility characteristics, high surface area to volume ratio, easy degradation and environmental protection properties. In recent years, it has been used as a drug carrier in the study of sustained drug release, which has attracted wide attention of scholars. This paper expounds the different types and properties of nanocellulose,

*通讯作者。

文章引用: 邓奕慧, 韦正, 李杭烨, 汤圣奎. 纳米纤维素在药物缓释中的应用[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(5): 632-643.
DOI: 10.12677/hjfn.2025.145069

discusses the drug carrier properties and release mechanism of nanocellulose, and reviews the current research results of nanocellulose and its composites in the field of sustained drug release. Through the analysis of the existing literature, it aims to provide a reference for further study of nanocellulose, and to provide a basis for promoting the development of nanocellulose in the field of drug delivery.

Keywords

Nanocellulose, Drug Sustained Release, Biological Materials, Drug Delivery, Application

Copyright © 2025 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

在当前化石能源使用过度致使环境污染问题日益严重的背景下, 对于可再生的生物质资源研究、应用, 成为研究学者关注的热点[1][2]。木质纤维素来源广泛、储量丰富、最具发展潜力的可再生资源之一, 有潜力作为化石能源的替代品[3][4]。纤维素、半纤维素和木质素共同构成了木质纤维素, 其中纤维素这一物质是自然界含量最为丰富的可再生高分子有机物[5][6]。纤维素以 D-葡萄糖单元为基本结构, 通过 1,4- β -糖苷键形成线性聚合物[7], 遍布于自然界各处。据统计, 在全球范围内纤维素的年产量十分惊人, 介于 $7.5 \sim 10.0 \times 10^{10}$ 吨之间[8][9]。

随着纳米技术的发展, 借助化学、物理及生物学等多种手段, 可从自然界的纤维素原料中提炼并分离出微小的纳米纤维素(nanocellulose, NCC)[10], 其直径介于 1 至 100 纳米之间, 是化学构成要素为纤维素的纳米级别高分子物质。依据原料的出处、生产过程及外观特性差异, 纳米纤维素可大致划分为四类: 纤维素纳米纤丝(CNF)、纳米纤维素晶体(CNC)、细菌纳米纤维素(BNC)以及静电纺丝纤维素纳米纤丝(ECNF)[11]-[15]。纳米纤维素具有生物相容性、较高的比表面积、易于分解、可持续再生、无害特质等优势[16][17], 尤其是具有的良好生物兼容特性和可分解属性, 在生物医学领域应用较广, 如作为药物缓释系统、创伤敷贴材料、穿透性创伤止血用品、早期疾病诊断、治疗复杂病症、以及组织工程中的支架材料等方面[18]-[21] (示例图见图 1)。

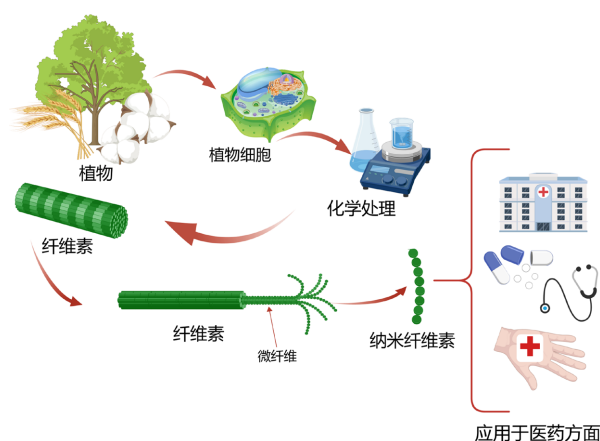


Figure 1. Nanocellulose could be extracted from plants and used for catalytic and biomedical

图 1. 纳米纤维素可以从植物中提取, 并用于催化和生物医学应用

药物缓释系统作为现代药物递送技术关键部分,可实现药物体内持续释放,维持稳定浓度、减少给药频率并提升患者依从性[22]。传统药物递送存在生物利用度低、释放不稳定等问题,纳米纤维素可提升药物负载与释放效率[23],此外,纳米纤维素具有的生物相容性与降解性保障体内使用安全,可有效降低药物毒性反应[24]。纳米纤维素可通过化学改性调控表面性质,实现药物释放速率精准控制,为个性化药物治疗提供理论支撑[25]-[27]。本文探讨纳米纤维素在药物缓释系统的应用现状与潜在优势,剖析其在药物递送领域研究进展,通过文献总结,为纳米纤维素研究及新型药物递送系统设计提供参考与新思路。

2. 纳米纤维素的分类

2.1. 纤维素纳米纤丝(CNF)

纤维素纳米纤丝(cellulose nanofibers, CNF)也通常被称为微纤维化纤维素(microfibrotic cellulose, MFC)、纤维素微纤维(cellulose microfibril, CMF),其直径一般在 5~60 nm 之间,长度为几微米,呈现非晶态和晶态部分,微观下呈纤维丝状[28]。CNF 具有环保无污染、绿色可再生等优点,用于生物医药材料领域、食品封装介质、吸附剂以及能量存储介质等方面[29]。木质纤维类生物质是纤维素纳米纤丝的主要来源[30],包括木材、甜菜和棉花等(示例见图 2)。

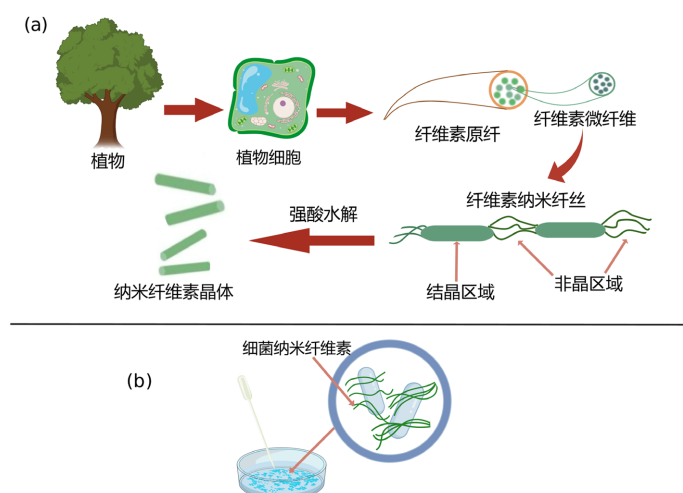


Figure 2. Nanocellulose crystals: (a) Schematic diagram of the hierarchical structure of cellulose and the preparation of nanocellulose crystals via reaction with strong acid, (b) Preparation of bacterial nanocellulose by culturing cellulose-synthesizing bacteria

图 2. 纳米纤维素晶体: (a) 纤维素的分层结构及与强酸反应获得纳米纤维素晶体示意图, (b) 通过培养合成纤维素的细菌得到细菌纳米纤维素

2.2. 纳米纤维素晶体(CNC)

纳米纤维素晶体(cellulose nanocrystal, CNC)也可称为纤维素纳米晶须(cellulose nanowhisker, CNW)、纤维素微晶体(cellulose microcrystal, CMC),其直径为 2~20 nm,长度为 100~500 nm,是一种棒状纤维素晶体。CNC 具有高比表面积、高结晶度等纳米颗粒的结构特征,还具有优异的稳定性和较高的机械强度以及优秀的光学性能[31]。棉花、秸秆、稻壳等都可以用来制备 CNC。

2.3. 细菌纳米纤维素(BNC)

细菌纳米纤维素(bacterial nanocellulose, BNC),也叫细菌纤维素(bacterial cellulose, BC)、微生物纤维素(microbial cellulose, MC)、无细胞纤维素(cellulose-free cellulose, CFC)、再生细菌纤维素(regenerated

bacterial cellulose, RBC), 长度不定, 直径 20~100 nm, 通常由微生物合成而得。BNC 与植物纤维素相比, 其具备超微细网络结构, 兼具优异保水能力、高弹性模量与拉伸强度[32], 优于植物纤维素。

3. 纳米纤维素的制备

3.1. 化学法

用化学法制备纳米纤维素, 纤维素的物化性质和形态结构会发生改变。常见的几种化学处理方法及其制备原理和特点见表 1。

Table 1. Principles and characteristics of nanocellulose prepared by different chemical methods

表 1. 不同化学法的制备纳米纤维素的原理及特点

方法名称	制备原理	特点	文献
酸水解法	通过使用酸性溶液作为催化剂对纤维素进行水解, 使其分解为纳米级的纤维素	优点: 产品高结晶度 缺点: 成本较高、会对环境造成污染	[33]-[35]
四甲基哌啶氧化物 (TEMPO)氧化法	通过 TEMPO 催化剂使纤维素分子链上的羟基发生氧化反应, 生成羧基, 从而改变纤维素的化学性质和结构, 再经过适当的机械处理制得纳米纤维素	优点: 操作简单、反应条件温和、产品纯度高 缺点: 成本较高	[35] [36]
低共熔溶剂(DES)法	DES 能够使纤维素润胀, 减弱纤维素分子链之间的氢键结合, 从而促进纤维素的解离和纳米化	优点: 能耗低、成本低、绿色环保 缺点: 溶剂的选择和处理以及再生问题有待解决	[35]-[37]

3.2. 机械法

机械法制备纳米纤维素的原理是通过物理手段对纤维素材料进行切割、研磨等处理, 破坏其微晶结构, 从而将其分解成纳米级的纤维素颗粒[38]。常见的几种机械处理方法及其制备原理和特点见表 2。

Table 2. Principles and characteristics of nanocellulose prepared by different mechanical methods

表 2. 不同机械法的制备纳米纤维素的原理及特点

方法名称	制备原理	特点	文献
高压均质法	通过施加高压使纤维原料在均质机内高速喷出, 撞击在碰撞环上, 产生空穴、剪切和撞击等物理作用从而破碎纤维原料, 减小纤维的尺寸	优点: 效率高、环保 缺点: 物料易堵塞、设备维护成本高、设备操作复杂	[39] [40]
机械球磨法	将纤维素原料与高密度的小球一起放入球磨机中, 通过高速运转的小球反复研磨, 直到纤维素原料被磨碎成纳米颗粒	优点: 操作简单、绿色环保 缺点: 效率低、能耗高、可能会引入杂质	[39] [40]
超声波法	基于超声波的机械效应、空化效应和热效应产生的高温高压高速冲击波, 来破坏纤维组织, 从中分离得到纳米纤维素	优点: 操作方便、环境友好 缺点: 处理不均一、得率低、能耗高、噪声大	[39] [40]
蒸汽爆破法	通过高压蒸汽爆破和快速降温的过程来破坏纤维结构, 最终制备出纳米纤维素	优点: 能量消耗相对较低 缺点: 设备要求高、产品稳定性受损	[39]

续表

冷冻破碎法	通过极速的降温使纤维内部高度脆化后再对其进行破碎处理，最终得到纳米纤维素	优点：操作简便、产品纯净且热稳定性高 缺点：制得率不高	[39]
微射流法	对纤维素原料进行多次循环的强烈的剪切、撞击和湍流作用，从而破坏纤维素的微观结构，使其分解成纳米级别的纤维素纤维	优点：效率高、适用生物质资源范围广、能得到直径较为均一的纳米纤维素 缺点：能耗较高，难以用于工业化生产	[40]

3.3. 机械力化学法

为了解决直接物理法在制备纳米纤维素时，其能源消耗巨大和效率低等不好的因素，采用机械化学法，利用化学药剂或纤维素酶对纤维素原料进行初步处理，随后借助机械手段破坏其微晶构造，进而实现纳米纤维素的精准制备。该方法高效环保，但对设备要求较高，设备购置和维护成本较高[40]。

3.4. 微生物法

微生物法是近年来发展较快的纳米纤维素制备方法，主要是通过控制微生物(例如木醋杆菌[41]、瑞典氏木霉[42]等)的代谢作用来合成纳米纤维素。使用微生物法制备的纳米纤维素剔除了木质素、半纤维素及果胶等冗余成分，因此具有更高的结晶度和更优的性能。在微生物法处理过程中，反应条件较为和缓且对环境影响较小，然而其生产周期拖沓，效率偏低，经济成本相对较高，导致该方法不宜在工业化的大规模生产中使用[35]。

3.5. 酶解法

采用酶解法制备纳米纤维素，采用纤维素酶于适宜的温度和环境下，促使纤维素分解转化为细微至纳米尺寸的短小片段，制备得到的纳米纤维素结晶度高、纯度高[43]，该方法制备条件的温和、反应有专属性，但其制备成本高、周期冗长。通过酶解法规模化制备纳米纤维素的生产工艺有待完善，还需要深入探索[44]。

3.6. 静电纺丝法

通过静电纺丝技术，纤维素溶液在静电场的作用下，制备出纳米纤维素[45]。利用此技术生产的纳米纤维素，具有比表面积和丰富的孔隙结构，但该制备方法的能耗较高，以及众多影响产出效率的因素，包括溶液的黏稠度、导电性、纺丝电压和喷头与收集器之间的距离等。有机溶剂的回收难题也是该技术的一个显著问题[35]。

3.7. 高附加值制浆法

高附加值制浆(AVAP)法[46] [47]，通过调控木质素包裹效应，定向制备具有亲水或疏水特性的纳米纤维素。该技术应用于生产过程中，生产过程中的药品及副产品均可实现回收利用，既能降低生产成本，又能达成绿色生产目标[48]。

4. 纳米纤维素作为药物载体

4.1. 机械强度与稳定性

纳米纤维素具备的机械强度与稳定性，使其适用于药物传递系统，能够确保载药过程中的形态稳定

性。采用 3D 打印技术制备的纳米纤维素复合材料,其机械性能与药物释放特性均表现出良好的特性[49]。纳米纤维素的多孔结构可提升药物负载与释放效率,进而增强其在生物医学领域的应用潜力。

4.2. 生物相容性与生物降解性

纳米纤维素作为一种天然高分子材料,具有良好的生物相容性和生物降解性。纳米纤维素在体内的降解产物是无毒的,且不会对生物体造成负面影响,在药物传递系统具有较大的潜力[50]。其具有的良好生物相容性使其能够有效地与生物组织相互作用,促进药物的靶向释放和提高治疗效果。如利用纳米纤维素基材料制备的智能释放系统,可以根据体内微环境变化调节药物释放速率,满足临床需求[51]。可见,纳米纤维素的良好生物相容性和生物降解性,使其成为药物载体的理想选择。

4.3. 药物负载能力

文献复习发现,纳米纤维素的药物负载能力受其表面特性与结构特征的影响,通过物理吸附或化学修饰手段,可提升其药物负载能力。药物与纳米纤维素复合后,药物负载率可达 38.1%,且在 pH 敏感条件下展现优异释放特性[52]。纳米纤维素以多孔结构与超大比表面积实现高药物负载,在靶向传递中通过精准递送与可控释放,可提升药物生物利用度与治疗效果[53]。因此,优化纳米纤维素的药物负载能力,是提升其在药物传递系统中应用效能的关键环节。

5. 药物释放机制

5.1. 扩散作用控制释放

扩散控制释放是药物释放机制中最常见的一种形式,药物通过固体载体的孔隙或膜的扩散进入用药部位。纳米纤维素具有孔隙结构和较大的比表面积,药物可被吸附或包裹在其孔隙和表面。当溶剂接触到纳米纤维素时,溶剂会逐渐渗透进入孔隙,使药物溶解并通过孔隙缓慢扩散出来,从而实现缓释。具有高吸附能力的纳米纤维素,可使其负载的零价铁更好地分散,从而影响物质的扩散释放[54]。肖博[55]以纳米纤维素气凝胶作为载体,药物可通过气凝胶孔隙以扩散形式释放,气凝胶的纳米级多孔结构可减缓药物的扩散速度,实现药物的缓释。

5.2. 溶胀控制释放

纳米纤维素在接触到特定溶剂时会发生溶胀,形成一种凝胶状的结构。药物被包裹在溶胀的纳米纤维素网络中,随着纳米纤维素的溶胀程度逐渐增加,网络结构的孔隙也会相应变大,药物分子便可以从孔隙中逐渐被释放出来。而纳米纤维素的溶胀过程相对缓慢,所以可以有效控制药物的释放速率,从而达到缓释的效果。纤维素处于水性环境(如人体的胃肠道、组织液等)中时,其分子链上的羟基会与水分子发生相互作用,导致纤维素吸水溶胀[10]。同时,还可以通过控制温度来改变水凝胶的溶胀比,达到药物控释[16]。

5.3. 化学键控制释放

通过化学反应将药物分子与纳米纤维素表面的官能团进行化学键合,形成稳定的共价键或离子键,可通过外界 pH、温度或酶的刺激使其化学键断裂,使药物从纳米纤维素释放,这种化学键合的方式可以使药物与纳米纤维素紧密结合,有效控制药物的释放时间和速率[56]。也可通过在纳米纤维素表面接枝具有温度、pH 双重刺激响应的聚合物,在特定温度或 pH 条件下,响应性聚合物通过构象变化(如溶胀/收缩)或其与药物间的作用键变化,实现对药物释放调控[57]。

5.4. 静电作用控制释放

纳米纤维素表面带有一定的电荷，当负载带相反电荷的药物分子时，会通过静电吸引作用将药物分子吸附在其表面。在释放过程中，随着外界环境中离子强度等条件的变化，静电作用会逐渐减弱，药物分子就会逐渐从纳米纤维素表面解吸并释放出来，实现缓释。静电纺丝过程中聚合物与纳米纤维素等物质的静电作用会影响纤维膜的结构和性能，进而影响物质的吸附与释放的过程[58]。

5.5. 纤维网络影响控释

药物被负载于纳米纤维素体系中，药物分子在向外扩散的过程中必须绕过复杂交错的纤维网状结构。因物理障碍，药物分子的扩散轨迹曲折且距离拉长，进而减缓了其扩散速率，实现了缓慢释放的效果[59][60]。若将纳米纤维素与其他物质结合，纳米纤维素可在 Pickering 乳液中形成稳定结构，对于药物的控释效果会更好[61]。

6. 纳米纤维素在药物缓释领域的研究应用

纳米纤维素具有高比表面积、优异的力学性能、良好的生物相容性、可降解性等特性，可作为药物递送载体[62]。用于制备纳米纤维素的纤维素原料来源十分广泛，表 3 为不同原料来源制备的纳米纤维素运用于药物缓释的部分应用实例。

Table 3. Examples of nanocellulose applications prepared from different raw material sources for sustained drug release
表 3. 不同原料来源制备的纳米纤维素运用于药物缓释的实例

原料来源	制备方法	结论	文献
棉纤维	利用纳米纤维素同时负载纳米金和姜黄素，制备出结构简单的双重疗效药物载体	将难溶药物姜黄素的负载量提高至 31.4 μg 每毫克纳米颗粒，为天然抗肿瘤成分负载材料提供示范	[63]
槟榔种子粉	采用酸水解制备纤维素，合成锌离子集成的 QT 递送系统并创建 CNF-Zn-QT 复合材料	CNF-Zn-QT 复合物中，QT 与锌离子形成配位键，锌离子与纳米纤维素键合，使 QT 更难释放，从而减缓释放速率	[64]
废黄麻纤维	由废黄麻纤维和废鱼鳞合成的 CNF 和 NCG 通过静电纺丝技术制备 PVA/MC/PEG 纳米纤维纳米复合材料	含有 1 wt.% CNF/NCG 生物纳米填料的 PVA/MC/PEG 生物纳米复合材料与其他载药 BNCs 膜相比，表现出更好的性能，使其成为透皮给药系统的良好候选者	[65]
小麦秸秆	通过改性 CNC 制备 CNC/支链淀粉/高酰基结冷硬胶囊膜(NCPGs)	NCPGs 和明胶硬胶囊的药物释放速度比市售普鲁兰多糖硬胶囊快，在 20 分钟内实现了接近 100% 的阿莫西林累积释放，且满足中国药典的规定要求	[66]

7. 纳米纤维素复合材料在药物缓释领域的研究应用

7.1. 纳米纤维素复合水凝胶材料

胶体凝胶具有由亲水性聚合物组成的三维网络，该聚合物可以吸收并通过溶胀方法在水生环境中保留大量水，称为水凝胶[67]。在生物医学应用中，水凝胶因其可调节的物理性质以及它们的弹性、黏膜粘附性、对周围刺激的反应而溶胀和溶胀特性，在药物输送和缓释系统中具有巨大潜力[68][69]。

CNF 水凝胶已应用于大分子蛋白和肽药物控释或局部递送[70]，Hafizi 等人[71]通过伽马辐照法将不

同的 CNC 负载引入交联明胶基质中, 制备 pH 敏感水凝胶, 明胶/4CNC 水凝胶显示出良好的溶胀能力, 表明 γ 辅助交联明胶/CNC 水凝胶是有潜力的药物递送系统。陈甜甜[72]通过物理包裹的方式将阿司匹林 (ASP)、CNF 和 SA 三者混合均匀后制成 ASP/CNF/SA 复合水凝胶载药体系, 并研究 ASP 在不同 pH 环境中的体外缓释行为, 发现 ASP/CNF/SA 复合水凝胶载药体系的药物释放具有 pH 响应性, 药物分子的释放速率随着环境 pH 的升高而加快, 随着 pH 的升高而增加药物释放量增大, 研究结果表明纳米纤维素复合水凝胶可用于医药领域。

7.2. 纳米纤维素复合气凝胶材料

气凝胶是一种新型生物材料, 具有轻质泡沫状结构、高孔隙率和低密度, 且其大表面积可容纳高药物含量, 因此在药物传递方面也有较大潜力[73]。Pantić 等人[74]的研究表明, BNC/CNC 的加入降低了气凝胶的整体质量降解, 增强了结构、形态和热性能, 且气凝胶在水性介质中的行为也得到了改善, 根据实验结果可知, 除 SA/CNC10 外, 纤维素的含量越高, 溶胀率及其在水中的稳定性就越高。Lu 等人[75]从木材上分解的 CNF 作为细菌纤维素的替代材料来固定胶原蛋白, 将醛 CNFs 与胶原蛋白交联, 得到复合气凝胶, 研究结果表明, 由于吸水率高、与细胞有很强的生物相容性, 这些材料能使药物缓释, 利于伤口愈合。纳米纤维素复合气凝胶材料, 能够运用于药物缓释领域。

7.3. 纳米纤维素基 Pickering 乳液

Pickering 乳液研究主要致力于局部和口服给药系统, 在较小程度上用于注射途径[76]。Erdagi 等人[77]以铵化纳米纤维素(Q-NC)和薯蓣苷元共轭海藻酸盐(DGN-ALG)颗粒为稳定剂, 制备亲水胶体纳米载体的多层自组装静电水包油皮克林乳液, 并以喹茜素作为模型封装药物进行体外释放研究, 根据体外药物释放曲线显示, 其在 PBS pH 7.4 中可持续释放超过 17 天, 增强了其治疗的效果。张梦[78]利用芒果核壳提取纤维素制备 WPI-MKSCNFs Pickering 乳液体系负载姜黄素, 结果显示 WPI-MKSCNFs 复合物的浓度越高, 其负载姜黄素乳液的贮藏稳定性和保留率越高。模拟体外消化过程中, 游离脂肪酸的释放量随 WPI-MKSCNFs 复合物浓度的增大而降低, 姜黄素的生物接受率最高为 74.80%。以上研究结果表明, 纳米纤维素基皮克林乳液的运用能够使药物缓释(示例见图 3), 从而提高疗效和生物利用度。

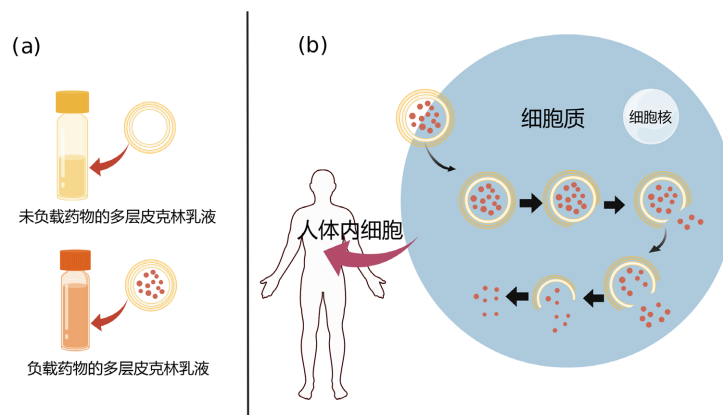


Figure 3. Schematic diagrams of the nanocellulose-based Pickering emulsion: (a) drug loading, (b) *in vivo* drug release process
图 3. 纳米纤维素基 Pickering 乳液的: (a) 负载药物示意图, (b) 是体内药物缓释过程示意图

8. 结论

从植物中提取纳米纤维素, 一直是研究学者关注的焦点, 其具有的结构性能、力学性能、表面特性

及生物相容性, 在生物材料领域应用具有较大的潜力。在药物缓释系统中, 纳米纤维素不仅能通过优化药物释放动力学提高生物利用度, 在降低毒副作用、增强治疗效果方面有其优势, 为临床药物治疗方案的优化提供了理论依据。

纳米纤维素在药物缓释中的应用中, 不同的制备方法、种类、给药途径, 对药物缓释的效果产生显著影响。为了挖掘纳米纤维素的潜力, 课题组下一步的研究应更加注重跨学科的合作, 结合材料科学、药理学和生物学工程等领域的知识, 开发符合临床需求的剂型, 助推纳米纤维素药物传递系统的应用转化。针对不同药物和治疗需求的个性化设计, 是课题组下一步研究的重要方向之一。纳米纤维素在药物缓释和传递系统中的应用潜力巨大, 下一步要结合临床应用现状, 还需深入研究其机制、优化材料特性, 坚信纳米纤维素能够为现代医学提供更为创新的解决方案, 提升治疗效果。

基金项目

河池学院 2024 年大学生创新创业计划项目(桑枝纳米纤维素的制备、结构表征、Pickering 乳液制备及应用研究)。

参考文献

- [1] Zhu, H., Luo, W., Ciesielski, P.N., Fang, Z., Zhu, J.Y., Henriksson, G., *et al.* (2016) Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications. *Chemical Reviews*, **116**, 9305-9374. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>
- [2] Curvello, R., Raghuwanshi, V.S. and Garnier, G. (2019) Engineering Nanocellulose Hydrogels for Biomedical Applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, **267**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.03.002>
- [3] Ma, L., Wang, T., Liu, Q., Zhang, X., Ma, W. and Zhang, Q. (2012) A Review of Thermal-Chemical Conversion of Lignocellulosic Biomass in China. *Biotechnology Advances*, **30**, 859-873. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.016>
- [4] Lane, M.K.M., Rudel, H.E., Wilson, J.A., Erythropel, H.C., Backhaus, A., Gilcher, E.B., *et al.* (2023) Green Chemistry as Just Chemistry. *Nature Sustainability*, **6**, 502-512. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01050-z>
- [5] 朱旭冉, 李潇, 李平, 等. 木质纤维素预处理技术研究进展[J]. 广东化工, 2024, 51(7): 72-75.
- [6] 付时雨. 纤维素的研究进展[J]. 中国造纸, 2019, 38(6): 54-64.
- [7] Long, L., Weng, Y.-X. and Wang, Y.-Z. (2018) Cellulose Aerogels: Synthesis, Applications, and Prospects. *Polymers*, **10**, Article No. 623. <https://doi.org/10.3390/polym10060623>
- [8] Beck, S., Bouchard, J. and Berry, R. (2010) Controlling the Reflection Wavelength of Iridescent Solid Films of Nanocrystalline Cellulose. *Biomacromolecules*, **12**, 167-172. <https://doi.org/10.1021/bm1010905>
- [9] Koshani, R. and Madadlou, A. (2018) A Viewpoint on the Gastrointestinal Fate of Cellulose Nanocrystals. *Trends in Food Science & Technology*, **71**, 268-273. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.10.023>
- [10] 刘莹莹, 夏明凤, 徐柯, 等. 纤维素纳米纤维复合材料在药物缓释中的应用[J]. 中国造纸, 2023, 42(1): 111-120.
- [11] 张思航, 付润芳, 董立琴, 等. 纳米纤维素的制备及其复合材料的应用研究进展[J]. 中国造纸, 2017, 36(1): 67-74.
- [12] Shu, D., Xi, P., Cheng, B., Wang, Y., Yang, L., Wang, X., *et al.* (2020) One-Step Electrospinning Cellulose Nanofibers with Superhydrophilicity and Superoleophobicity Underwater for High-Efficiency Oil-Water Separation. *International Journal of Biological Macromolecules*, **162**, 1536-1545. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.175>
- [13] de Oliveira, J.P., Bruni, G.P., el Halal, S.L.M., Bertoldi, F.C., Dias, A.R.G. and Zavareze, E.d.R. (2019) Cellulose Nanocrystals from Rice and Oat Husks and Their Application in Aerogels for Food Packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, **124**, 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.205>
- [14] Jacek, P., Kubiak, K., Ryngajło, M., Rytczak, P., Paluch, P. and Bielecki, S. (2019) Modification of Bacterial Nanocellulose Properties through Mutation of Motility Related Genes in *Komagataeibacter hansenii* ATCC 53582. *New Biotechnology*, **52**, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.05.004>
- [15] 王淑红. 静电纺丝制备几种聚合物/无机复合纳米纤维与性能研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [16] 刘慰, 司传领, 杜海顺, 等. 纳米纤维素基水凝胶的制备及其在生物医学领域的应用进展[J]. 林业工程学报, 2024, 9(1): 1-6.

- 2019, 4(5): 11-19.
- [17] 吕天艺, 张书敏, 陈媛, 等. 不同形态纳米纤维素的制备方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 281-288.
 - [18] Seabra, A.B., Bernardes, J.S., Fávaro, W.J., Paula, A.J. and Durán, N. (2018) Cellulose Nanocrystals as Carriers in Medicine and Their Toxicities: A Review. *Carbohydrate Polymers*, **181**, 514-527. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.014>
 - [19] 王力. 纳米纤维素复合材料的制备及其生物医学应用[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2022.
 - [20] Plackett, D., Letchford, K., Jackson, J. and Burt, H. (2014) A Review of Nanocellulose as a Novel Vehicle for Drug Delivery. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, **29**, 105-118. <https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-01-p105-118>
 - [21] 王潇潇, 陈燕, 柳炜. 纳米纤维素在生物医学领域的研究进展与应用[J]. 中国造纸学报, 2023, 38(4): 126-133.
 - [22] Chen, Q., Yang, Z., Liu, H., Man, J., Oladejo, A.O., Ibrahim, S., *et al.* (2024) Novel Drug Delivery Systems: An Important Direction for Drug Innovation Research and Development. *Pharmaceutics*, **16**, Article No. 674. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16050674>
 - [23] Khan, S.A.R., Tabish, M. and Yu, Z. (2023) Mapping and Visualizing of Research Output on Waste Management and Green Technology: A Bibliometric Review of Literature. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, **41**, 1203-1218. <https://doi.org/10.1177/0734242x221149329>
 - [24] Khorsandi, D., Jenson, S., Zarepour, A., Khosravi, A., Rabiee, N., Iravani, S., *et al.* (2024) Catalytic and Biomedical Applications of Nanocelluloses: A Review of Recent Developments. *International Journal of Biological Macromolecules*, **268**, Article ID: 131829. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131829>
 - [25] Lossada, F., Hoenders, D., Guo, J., Jiao, D. and Walther, A. (2020) Self-Assembled Bioinspired Nanocomposites. *Accounts of Chemical Research*, **53**, 2622-2635. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00448>
 - [26] 刘健弘, 张欣樟, 李颖娴, 等. 药物缓释体系的研究进展[J]. 广东化工, 2024, 51(15): 90-92+45.
 - [27] Yadav, D. and Dewangan, H.K. (2020) PEGYLATION: An Important Approach for Novel Drug Delivery System. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, **32**, 266-280. <https://doi.org/10.1080/09205063.2020.1825304>
 - [28] Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A. and Bras, J. (2012) Microfibrillated Cellulose—Its Barrier Properties and Applications in Cellulosic Materials: A Review. *Carbohydrate Polymers*, **90**, 735-764. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026>
 - [29] 王凯晴. MOF@纤维素纳米纤维复合材料的制备及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2023.
 - [30] Yi, T., Zhao, H., Mo, Q., Pan, D., Liu, Y., Huang, L., *et al.* (2020) From Cellulose to Cellulose Nanofibrils—A Comprehensive Review of the Preparation and Modification of Cellulose Nanofibrils. *Materials*, **13**, Article No. 5062. <https://doi.org/10.3390/ma13225062>
 - [31] Luo, J., Chang, H., Bakhtiary Davijani, A.A., Liu, H.C., Wang, P., Moon, R.J., *et al.* (2017) Influence of High Loading of Cellulose Nanocrystals in Polyacrylonitrile Composite Films. *Cellulose*, **24**, 1745-1758. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1219-8>
 - [32] 张艳, 孙怡然, 于飞, 等. 细菌纤维素及其复合材料在环境领域应用的研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2418-2427.
 - [33] Kumari, D. and Singh, R. (2018) Pretreatment of Lignocellulosic Wastes for Biofuel Production: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **90**, 877-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
 - [34] 张赛, 侯刘涛, 林钰程, 等. 酸解法制备生物基纳米纤维素研究进展[J]. 林产化学与工业, 2024, 44(5): 159-172.
 - [35] 张关涛, 张东杰, 李娟, 等. 纳米纤维素的制备及其在食品包装材料中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 430-437.
 - [36] Tang, Z., Lin, X., Yu, M., Mondal, A.K. and Wu, H. (2024) Recent Advances in Tempo-Oxidized Cellulose Nanofibers: Oxidation Mechanism, Characterization, Properties and Applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, **259**, Article ID: 129081. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129081>
 - [37] Bi, X., Guo, J., Wen, J. and Yu, C. (2023) Mechanistic Analysis of Nanocellulose Formation Tuned by Deep Eutectic Solvents. *Cellulose*, **30**, 9349-9364. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05443-x>
 - [38] Siqueira, G., Bras, J. and Dufresne, A. (2010) Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications. *Polymers*, **2**, 728-765. <https://doi.org/10.3390/polym2040728>
 - [39] 任海伟, 徐志航, 邢雪晔, 等. 纳米纤维素的制备、结构性质及应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 215-224.
 - [40] 贾丽佳, 王汉琛, 黄彪, 等. 纳米纤维素的制备及功能应用[J]. 生物质化学工程, 2024, 58(4): 43-56.
 - [41] Brown, A.J. (1886) XLIII.—On an Acetic Ferment Which Forms Cellulose. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, **49**, 432-439. <https://doi.org/10.1039/ct8864900432>

- [42] Satyamurthy, P., Jain, P., Balasubramanya, R.H. and Vigneshwaran, N. (2011) Preparation and Characterization of Cellulose Nanowhiskers from Cotton Fibres by Controlled Microbial Hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, **83**, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.07.029>
- [43] Jirathampinyo, S., Chumchochart, W. and Tinoi, J. (2023) Integrated Biobased Processes for Nanocellulose Preparation from Rice Straw Cellulose. *Processes*, **11**, Article No. 1006. <https://doi.org/10.3390/pr11041006>
- [44] Yang, H., Bai, L., Duan, Y., Xie, H., Wang, X., Zhang, R., *et al.* (2023) Upcycling Corn Straw into Nanocelluloses via Enzyme-Assisted Homogenization: Application as Building Blocks for High-Performance Films. *Journal of Cleaner Production*, **390**, Article ID: 136215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136215>
- [45] 王兴雪, 王海涛, 钟伟, 等. 静电纺丝纳米纤维的方法与应用现状[J]. 非织造布, 2007(2): 14-20.
- [46] Nelson, K. and Retsina, T. (2014) Innovative Nanocellulose Process Breaks the Cost Barrier. *TAPPI Journal*, **13**, 19-23. <https://doi.org/10.32964/tj13.5.19>
- [47] Nelson, K., Retsina, T., Iakovlev, M., van Heiningen, A., Deng, Y., Shatkin, J.A., *et al.* (2016) American Process: Production of Low Cost Nanocellulose for Renewable, Advanced Materials Applications. In: Madsen, L.D. and Svedberg, E.B., Eds., *Materials Research for Manufacturing: An Industrial Perspective of Turning Materials into New Products*, Springer International Publishing, 267-302. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23419-9_9
- [48] Kyle, S., Jessop, Z.M., Al-Sabah, A., Hawkins, K., Lewis, A., Maffei, T., *et al.* (2018) Characterization of Pulp Derived Nanocellulose Hydrogels Using AVAP® Technology. *Carbohydrate Polymers*, **198**, 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.091>
- [49] Mohan, D., Khairullah, N.F., How, Y.P., Sajab, M.S. and Kaco, H. (2020) 3D Printed Laminated CaCO₃-Nanocellulose Films as Controlled-Release 5-Fluorouracil. *Polymers*, **12**, Article No. 986. <https://doi.org/10.3390/polym12040986>
- [50] Liu, S., Qamar, S.A., Qamar, M., Basharat, K. and Bilal, M. (2021) Engineered Nanocellulose-Based Hydrogels for Smart Drug Delivery Applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, **181**, 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.147>
- [51] Kopač, T., Lisac, A., Mravljak, R., Ručigaj, A., Krajnc, M. and Podgornik, A. (2021) Bacteriophage Delivery Systems Based on Composite polyHIPE/Nanocellulose Hydrogel Particles. *Polymers*, **13**, Article No. 2648. <https://doi.org/10.3390/polym13162648>
- [52] Chen, J., Huang, H., Lu, R., Wan, X., Yao, Y., Yang, T., *et al.* (2022) Hydrogen-Bond Super-Amphiphile Based Drug Delivery System: Design, Synthesis, and Biological Evaluation. *RSC Advances*, **12**, 6076-6082. <https://doi.org/10.1039/d1ra08624c>
- [53] Zou, R., Li, B., Duan, W., Lin, G. and Cui, Y. (2022) Synthesis of 3-Carene-Derived Nanocellulose/1,3,4-Thiadiazole-amide Complexes with Antifungal Activity for Plant Protection. *Pest Management Science*, **78**, 3277-3286. <https://doi.org/10.1002/ps.6952>
- [54] Li, S., Hu, X., Zhou, J., Zheng, S., Ma, Q., Fu, H., *et al.* (2024) Biomass-Derived Cellulose Nanocrystals Modified nZVI for Enhanced Tetrabromobisphenol a (TBBPA) Removal. *International Journal of Biological Macromolecules*, **268**, Article ID: 131625. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131625>
- [55] 肖博. 稻秆纤维素缓释材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [56] Ning, L., Jia, Y., Zhao, X., Tang, R., Wang, F. and You, C. (2022) Nanocellulose-Based Drug Carriers: Functional Design, Controllable Synthesis, and Therapeutic Applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, **222**, 1500-1510. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.266>
- [57] 梁渝廷. 温度、pH 双重响应性智能纳米纤维的制备及其药物缓释性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [58] 李婷婷, 张志明, 韩正波. 基于静电纺丝技术的聚合物基 MOFs 纳米纤维膜的研究进展[J]. 无机材料学报, 2021, 36(6): 592-600.
- [59] Pandey, A. (2021) Pharmaceutical and Biomedical Applications of Cellulose Nanofibers: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **19**, 2043-2055. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01182-2>
- [60] Huo, Y., Liu, Y., Xia, M., Du, H., Lin, Z., Li, B., *et al.* (2022) Nanocellulose-Based Composite Materials Used in Drug Delivery Systems. *Polymers*, **14**, Article No. 2648. <https://doi.org/10.3390/polym14132648>
- [61] Teo, S.H., Chee, C.Y., Fahmi, M.Z., Wibawa Sakti, S.C. and Lee, H.V. (2022) Review of Functional Aspects of Nanocellulose-Based Pickering Emulsifier for Non-Toxic Application and Its Colloid Stabilization Mechanism. *Molecules*, **27**, Article No. 7170. <https://doi.org/10.3390/molecules27217170>
- [62] Ghamari, M., Sun, D., Dai, Y., See, C.H., Yu, H., Edirisinghe, M., *et al.* (2024) Valorization of Diverse Waste-Derived Nanocellulose for Multifaceted Applications: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **280**, Article ID: 136130. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136130>
- [63] 田彦. 基于纳米纤维素、姜黄素和纳米金的多重疗效抗肿瘤药物研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学,

2021.

- [64] Li, Y., Yao, S., Chen, Y., Wu, L., Xiang, D. and Zhang, W. (2024) Synthesis and Characterization of Zinc Ion-Integrated Quercetin Delivery System Using Areca Nut Seeds Nanocellulose. *LWT*, **192**, Article ID: 115673. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115673>
- [65] Samanta, A.P., Ali, M.S., Orasugh, J.T., Ghosh, S.K. and Chattopadhyay, D. (2022) Crosslinked Nanocollagen-Cellulose Nanofibrils Reinforced Electrospun Polyvinyl Alcohol/Methylcellulose/Polyethylene Glycol Bionanocomposites: Study of Material Properties and Sustained Release of Ketorolac Tromethamine. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, **3**, Article ID: 100195. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100195>
- [66] Ding, Y., Zhong, B., Yang, T., Zhang, F., Liu, C. and Chi, Z. (2024) Carboxyl-Modified Nanocellulose (cNC) Enhances the Stability of cNC/Pullulan Bio-Nanocomposite Hard Capsule against Moisture Variation. *Carbohydrate Polymers*, **328**, Article ID: 121706. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121706>
- [67] Das, S., Ghosh, B. and Sarkar, K. (2022) Nanocellulose as Sustainable Biomaterials for Drug Delivery. *Sensors International*, **3**, Article ID: 100135. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100135>
- [68] Pandey, M., Mohamad, N. and Amin, M.C.I.M. (2014) Bacterial Cellulose/Acrylamide pH-Sensitive Smart Hydrogel: Development, Characterization, and Toxicity Studies in ICR Mice Model. *Molecular Pharmaceutics*, **11**, 3596-3608. <https://doi.org/10.1021/mp500337r>
- [69] Del Valle, L., Díaz, A. and Puiggali, J. (2017) Hydrogels for Biomedical Applications: Cellulose, Chitosan, and Protein/Peptide Derivatives. *Gels*, **3**, Article No. 27. <https://doi.org/10.3390/gels3030027>
- [70] Raghav, N., Sharma, M.R. and Kennedy, J.F. (2021) Nanocellulose: A Mini-Review on Types and Use in Drug Delivery Systems. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, **2**, Article ID: 100031. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100031>
- [71] Wan Ishak, W.H., Rosli, N.A., Ahmad, I., Ramli, S. and Mohd Amin, M.C.I. (2021) Drug Delivery and *in Vitro* Biocompatibility Studies of Gelatin-Nanocellulose Smart Hydrogels Cross-Linked with Gamma Radiation. *Journal of Materials Research and Technology*, **15**, 7145-7157. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.095>
- [72] 陈甜甜. 以抗炎药为模型制备纤维素纳米纤维载药体系[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- [73] Khan, N.R., Sharmin, T. and Bin Rashid, A. (2024) Exploring the Versatility of Aerogels: Broad Applications in Biomedical Engineering, Astronautics, Energy Storage, Biosensing, and Current Progress. *Heliyon*, **10**, e23102. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23102>
- [74] Pantić, M., Nowak, M., Lavrič, G., Knez, Ž., Novak, Z. and Zizovic, I. (2024) Enhancing the Properties and Morphology of Starch Aerogels with Nanocellulose. *Food Hydrocolloids*, **156**, Article ID: 110345. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110345>
- [75] Lu, T., Li, Q., Chen, W. and Yu, H. (2014) Composite Aerogels Based on Dialdehyde Nanocellulose and Collagen for Potential Applications as Wound Dressing and Tissue Engineering Scaffold. *Composites Science and Technology*, **94**, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.020>
- [76] Albert, C., Beladjine, M., Tsapis, N., Fattal, E., Agnely, F. and Huang, N. (2019) Pickering Emulsions: Preparation Processes, Key Parameters Governing Their Properties and Potential for Pharmaceutical Applications. *Journal of Controlled Release*, **309**, 302-332. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.07.003>
- [77] Ilkar Erdagi, S., Ngwabebhoh, F.A. and Yildiz, U. (2020) Pickering Stabilized Nanocellulose-Alginate: A Diosgenin-Mediated Delivery of Quinalizarin as a Potent Cyto-Inhibitor in Human Lung/Breast Cancer Cell Lines. *Materials Science and Engineering: C*, **109**, Article ID: 110621. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110621>
- [78] 张梦. 芒果核纤维素纳米纤维的结构表征、乳液制备及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.