

# 高分子水凝胶在医学领域应用的研究新进展

张倩<sup>1</sup> 安可心<sup>1</sup> 尚宏周<sup>2\*</sup> 孙晓然<sup>1</sup>

(华北理工大学<sup>1</sup> 化学与工程学院, <sup>2</sup>材料科学与工程学院 唐山 063210)

**摘要** 高分子水凝胶是具有三维网络结构的一种新型材料,吸水溶胀后质地柔软,与生物体组织相似,生物相容性和生物可降解性良好,具有一定的力学性能,因此在医学领域具有重要的应用。本文对高分子水凝胶在医学领域的研究热点进行了归纳总结,并重点阐述了高分子水凝胶在药物输送、组织工程支架、伤口敷料和生物传感器等医学领域应用的研究新进展,并对其未来发展趋势进行了展望。

**关键词** 高分子水凝胶 三维网络 医学领域

## Recent Research Development of Polymer Hydrogel in Medical Field

Zhang Qian<sup>1</sup>, An Kexin<sup>1</sup>, Shang Hongzhou<sup>2\*</sup>, Sun Xiaoran<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Chemical Engineering; <sup>2</sup> College of Material Science and Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063210)

**Abstract** Polymer hydrogel is a new material with three-dimensional network structure. It is soft after swelling, similar to biological tissue, and has good biocompatibility and biodegradability. In addition, the polymer chain contains a large number of active groups, which are easy to modify or bind to drugs. Therefore, the polymer hydrogel has received extensive attention in the medical field. In this paper, the research hotspots of polymer hydrogels in the medical field are summarized, and the latest research progress in the application of polymer hydrogels to medical fields such as drug delivery, tissue engineering scaffolds, wound dressings and biosensors is emphasized. The future development trend is prospected.

**Keywords** Polymer hydrogel, 3D network, Medical field

高分子水凝胶是通过物理或化学交联得到的具有 3D 网络结构的一种新型功能高分子聚合物,在医学研究领域具有巨大研究潜力。高分子水凝胶中含有大量的亲水基团,可以吸收大量水分发生溶胀并保持大量水分而不会被溶解。溶胀后的水凝胶呈现出的多孔结构,柔软程度与生物体组织十分相似。而且,水凝胶的表面不容易黏附蛋白质或者细胞,与生物体组织接触时体现出良好的生物相容性。经大量实验表明,高分子水凝胶不会影响生物体的正常生理代谢,而且具有生物可降解性。高分子水凝胶由于其三维网络结构赋予了其一定的力学性能,聚合物链上含有大量的活性基团,为凝胶改性或与药物相结合提供了基础,因此,水凝胶被广泛应用于药物缓释<sup>[1]</sup>、组织工程支架<sup>[2,3]</sup>、伤口敷料<sup>[4]</sup>等医学领域<sup>[5-7]</sup>。

而且随着科研人员技术的不断更新,越来越多性能优异的水凝胶被开发出来。本文主要介绍了近几年高分子水凝胶在生物医学领域的研究热点及其相关应用的新进展。

## 1 高分子水凝胶在医学领域的研究热点

### 1.1 智能响应性

传统的高分子水凝胶对环境的刺激没有响应,其释药过程完全不受控制,新一代的水凝胶要求要对环境刺激敏感并响应,当外界环境发生微小变化,包括物理变化(例如温度、电场、磁场、光、压力)和化学变化(例如 pH、离子浓度、葡萄糖浓度)时都会使凝胶迅速感知,同时做出反应。智能响应型水凝胶可以更好地控制药物的局部释

\* 联系人,尚宏周 男,教授,主要从事功能高分子材料的制备及性能研究。E-mail: zhouzhou198213@163.com

河北省属高校基本科研业务费项目(JYG2019003)和唐山市功能高分子材料基础创新团队项目(21130201D)资助

2022-10-24 收稿,2023-01-09 接受

放和持续时间。根据外界环境刺激的不同,可将水凝胶分为温度响应型水凝胶、pH 响应型水凝胶、光响应型水凝胶、氧化还原响应型水凝胶、磁响应型水凝胶<sup>[8]</sup>以及多重响应型水凝胶等,这些水凝胶可以显示出对环境的更快响应。

Hossein 等<sup>[9]</sup>设计了一种可注射 pH 和热敏磁性响应型水凝胶,可以用于癌细胞化疗/热疗的“智能”药物递送系统。利用硅烷偶联剂改性后的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒与改性聚乙烯醇和聚 *N*-异丙基丙烯酰胺由自由基聚合反应生成的水凝胶命名为“MH”,将丙烯酸硫醇化得到 PAA-SH,通过硫醇-烯点击化学反应将其接枝到 MH 水凝胶上,然后通过 EDC-NHS 偶联体系将叶酸与聚丙烯酸的羧基共轭,最终制备出水凝胶 F-MH。在 pH = 7.4 和 37℃ 下表现出缓慢的体外药物释放行为,在较低 pH 和较高温度下,药物能够快速释放,证实水凝胶 F-MH 在癌症的化疗/热疗中具有作为“智能”药物输送平台的潜力。

## 1.2 生物相容性

用于医学领域的水凝胶都是要与生物体组织或细胞直接接触的,因此水凝胶必须具有优异的生物相容性。

Lei 等<sup>[10]</sup>制备了一种基于席夫碱反应的自修复水凝胶,利用明胶与二醛羧甲基纤维素交联,该水凝胶具有理想的血液相容性和细胞相容性,可用于组织工程与伤口修复材料。You 等<sup>[11]</sup>制备了一种可原位形成的具有生物相容性的可注射多糖水凝胶,水凝胶在 30d 内被壳聚糖酶降解,溶液的 pH 保持中性且 H9c2 细胞呈现天然状态下正常增殖。Chen 等<sup>[12]</sup>用聚丙烯酸(PAA)、甘油和 Cu-MOP 制备用于伤口敷料的高生物相容性的水凝胶,其性能优于重组人表皮生长因子,组织实验表明,PAA-Cu-MOP 水凝胶可促进血管生成、刺激细胞增殖。Rahil 等<sup>[13]</sup>制备了一种可作为骨组织工程支架的多孔杂化水凝胶, $\beta$ -磷酸三钙( $\beta$ -TCP)纳米晶体通过分子间离子相互作用和氢键引入葡聚糖网络中, $\beta$ -TCP 通过水凝胶基质的均匀分布有助于提高孔隙率和溶胀能力,细胞实验表明具有良好的生物相容性。

## 1.3 生物可降解性

材料具有可生物降解性说明该材料在生物体中在一定条件下可以被正常生理活动代谢而降解掉。制备具有可降解性的水凝胶可以利用天然高分子材料,例如透明质酸类、海藻酸类、聚乳酸类、

聚氨基酸类和纤维素类等。研究者们已经开发出了大量性能优异的可降解水凝胶,应用于组织工程、药物载体等领域。

Wei 等<sup>[14]</sup>制备了一种可注射的聚( $\gamma$ -谷氨酸)基水凝胶,胶凝时间从 10s 到 95s 不等,可通过改变条件实现调节水凝胶机械强度、溶胀比等,包封牛血清白蛋白表现出持续释放行为,在组织工程或药物输送方面具有巨大潜力。Vincent 等<sup>[15]</sup>开发了一种可注射和可生物降解的 PNIPAAm-*b*-PLA-*b*-PEG-*b*-PLA-*b*-PNIPAAm 五嵌段共聚物的水凝胶,两亲性结构在加热时通过胶束间交联形成凝胶,可以通过胶束芯来用作疏水药物的输送装置,该水凝胶在脑/软组织工程以及药物输送方面显示出巨大的潜力。聚丙烯酯水解后降解为低摩尔量的聚合物链,改善了高分子量的水凝胶难降解的问题。

## 1.4 纳米复合性

纳米复合水凝胶是指由物理或化学交联的聚合物链与纳米材料相结合形成的 3D 混合网络。将聚合物与无机纳米粒子相结合,无机纳米粒子在水凝胶网络中作为多功能交联点,不仅增强了凝胶的机械性能,还可以让凝胶具有特定的性能。因此,越来越多研究者投入到纳米复合水凝胶的研究中。

Dai 等<sup>[16]</sup>通过氧化多糖和银纳米颗粒封装的阳离子树状聚合物设计了一种 pH 响应的纳米复合水凝胶,阳离子聚合物和银纳米粒子在抗菌活性方面显示出协同作用,并且实验表明复合水凝胶没有明显的溶血毒性、细胞毒性以及组织和生化毒性。Sakr 等<sup>[17]</sup>开发了一种用于组织工程的膨润土纳米颗粒和明胶甲基丙烯酸酯纳米复合水凝胶,膨润土浓度不同时,凝胶孔径存在差异,3D 细胞封装实验表明,在 5d 内保持了高细胞活力,可用于组织工程的进一步研究。Li 等<sup>[18]</sup>制备了一种基于  $\beta$ -环糊精( $\beta$ -CD)与聚乙二醇-金刚烷的主客体作用的 pH 响应原位水凝胶,组装的纳米粒子在 pH=1 的条件下成功转化为水凝胶,可用于预防组织损伤和治疗牙周炎等炎症性疾病。纳米复合水凝胶使凝胶结构和性能更好,赋予凝胶新的特性。

## 2 高分子水凝胶在医学领域的应用

### 2.1 药物缓释载体

药物缓释系统 (Drug delivery system,

DDS)<sup>[19]</sup>具有高效、低毒、靶向给药、给药次数少、安全性高等特点。水凝胶由于其良好的特性在药物缓释方面得到了广泛关注。水凝胶药物载体以其优异的载药能力和智能性得到了广泛关注。

Zhou 等<sup>[20]</sup>以果胶酰肼(pec-AH)与聚乙二醇二醛(PEGDA)为原料设计了生物相容性自愈水凝胶,并负载阿霉素(DOX)研究了其在肿瘤治疗中的应用。水凝胶不仅具有良好的力学性能和柔韧性,还具有优异的生物相容性和生物降解性,小鼠肿瘤模型实验表明,与直接注射 DOX 相比,负载 DOX 的水凝胶可以显著抑制肿瘤生长并消除副作用。Jo 等<sup>[21]</sup>由改性透明质酸和二硫化物的交联剂通过 Diels-Alder 点击化学反应快速生成水凝胶,搭载盐酸阿霉素(DOX)和吲哚菁绿(ICG)的水凝胶不仅具有高度的生物相容性,而且对人体组织无毒副作用。水凝胶在 pH=5 时,二硫苏糖醇(DTT)还原和双氧水氧化介质中以及近红外光照射后均显示出对 DOX 的快速释放,负载 DOX 和 ICG 的水凝胶在近红外光照射后显示出更强的抗肿瘤活性,实现了光热化疗协同效应。Kim 等<sup>[22]</sup>利用氧化琥珀聚糖(OSG),通过半溶解酸溶胶-凝胶过渡法制备了基于壳聚糖(CS)的 pH 响应多功能水凝胶,OSG/CS 提高了水凝胶的热稳定性和机械强度,并且表现出优异的自愈能力和抗菌效果。pH 为 2.0 时 5-氟尿嘧啶的释放速率远大于 pH 为 7.4 时,WST-8 测试证明水凝胶在 7d 后保持了良好的细胞活力和细胞增殖能力,表明了其作为生物相容性水凝胶材料的潜力。Suhail 等<sup>[23]</sup>制备了基于硫酸软骨素和海藻酸盐以及丙烯酸为原料的 pH 敏感的用于口服给药的水凝胶,研究了药物载体分别在 37℃ 下 pH=1.2 和 7.4 的酸性和碱性介质中的溶胀和药物释放性能,与 pH=1.2 时相比,在 pH=7.4 时检测到最大溶胀和药物释放。

水凝胶不仅具有 3D 网络结构,其机械性能可调节与不同组织相匹配,还可以模拟天然组织微环境,具有包封和递送细胞或治疗药物的能力以及持续或受控释放行为的高载药能力,除此之外,可注射水凝胶避免了手术损伤,减少了药物的全身毒副作用,显示出局部药物递送领域的巨大潜力。大多数凝胶在药物包封和递送过程中无法准确控制不同药物的比例,导致协同治疗疗效低下,此外一些凝胶的结构和合成过程很复杂,从而限制了其临床转化应用。因此,开发基于水凝胶

的药物递送系统是控制联合治疗药物比例和释放行为的简单有效的策略。

## 2.2 组织工程支架

在当代医学领域中,对于人体组织、器官缺损的治疗以及功能重建这一难题,器官和组织移植手术是其主要治疗手段,但人体器官供需比例极低,组织工程的出现有望成为攻克这一难题的有效治疗手段。组织工程学结合了材料学和细胞生物学,当人体中的不可再生组织发生损伤或者病变时,可以利用组织工程技术进行治疗。水凝胶由于其仿生特性被应用于组织工程中,水凝胶中负载生物活性部分,用以支持新组织形成<sup>[24]</sup>。

徐旭等<sup>[25]</sup>制备了一种新型瓣膜支架,利用聚乙二醇-海藻酸钠水凝胶交联去细胞瓣膜制备复合支架瓣膜,与临床上使用的戊二醛交联瓣膜相比,新型支架瓣膜的粗糙微结构更适合细胞增殖生长,最大应变能力也显著增大,生物学性能更好,具有成为下一代瓣膜替代物的潜力。黄波等<sup>[26]</sup>以甲基丙烯酸酐改性明胶和软骨源性基质微粒为原料,制备了软骨复合水凝胶支架,将兔骨髓间充质干细胞接种至复合水凝胶支架中,其支架内细胞形态与软骨细胞相似,且有更多的软骨基质分泌,复合水凝胶支架可更好地模拟软骨细胞生长微环境,促进骨髓间充质干细胞的生长增殖和成软骨分化。

Chen 等<sup>[27]</sup>受天然软骨的复杂细胞外基质(EMC)的启发,制备了一种异质双层水凝胶支架,利用甲基丙烯酸明胶和丙烯酰氨基葡萄糖为上层主要成分。模仿软骨 ECM,乙烯基膦酸作为非胶原蛋白类似物被掺入底层以诱导磷酸钙的原位生物矿化,促进骨髓间充质干细胞的成骨。体内评估实验证实其良好的生物相容性。

## 2.3 伤口敷料

伤口愈合涉及止血、炎症、分解代谢和合成代谢过程,而伤口敷料是影响伤口愈合速度的重要因素,伤口敷料不仅要吸收伤口的渗出物,还要保持伤口的湿润,有利于伤口的愈合,除此之外,还应具有阻挡外部感染源、透气性好、抑菌不易与组织发生粘连等特性。水凝胶作为医用伤口敷料,形态柔软且弹性好,更能够贴合创口,溶胀后可以较长时间保持创面湿润,3D 网络结构保证了其透气性,另外还可以将药物负载在凝胶中,更好地促进伤口的愈合。

Ma 等<sup>[28]</sup>采用氧化海藻酸盐和儿茶酚改性后

的明胶作为聚合物骨架,通过席夫碱键和儿茶酚-铁配位键双动态键原位交联,将聚多巴胺修饰的银纳米粒子引入水凝胶中,赋予了凝胶抗菌性和杀菌性,体内实验表明,其对于减少炎症反应和加速血管生成有明显效果。Huang 等<sup>[29]</sup>制备了一种由单宁酸、丙烯酰胺和大豆分离蛋白制成的粘合剂水凝胶,它具有很大的拉伸应变能力、拉伸强度和韧性,除此之外,不仅表现出良好的自愈性和生物相容性,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有很好的抗菌性。Dong 等<sup>[30]</sup>基于藻酸盐和阳离子抗菌剂季铵化合物制备了一种多功能水凝胶敷料,具有优异的防冻保湿性能和抗菌性,结合聚多巴胺光热疗法的协同作用,在全层伤口感染的大鼠模型实验中,明显加速了感染伤口的愈合,愈合率达到了 96.49%。冯天琪等<sup>[31]</sup>利用泊洛沙姆 F127 和 F68 为基体,添加壳聚糖为抑菌材料,成功制备出可抑菌的温敏水凝胶。水凝胶可以紧密贴合伤口,应用于不规则伤口愈合,有望在减少伤口感染,促进创伤愈合的治疗方面得以应用。

## 2.4 其他应用

水凝胶由于其柔韧性、柔软性以及生物相容性等特性被认为是软生物电子领域的理想候选者,可以作为包埋蛋白质的有效基质应用于生物传感方面。Wang 等<sup>[32]</sup>开发了一种基于柔性水凝胶生物传感器和小波变换-支持向量机(WT-SVM)算法的眼球运动控制轮椅原型,以此来帮助行动不便的患者自由控制轮椅。由导电 HPC/PVA(羟丙基纤维素/聚乙烯醇)水凝胶和柔性 PDMS(聚二甲基硅氧烷)底物制得的柔性水凝胶生物传感器,将其贴于轮椅使用者的额头上,以收集心电图(EOG)和应变信号,其平均识别准确率达到 96.3%,可对轮椅精准操控。

为了实现仿生运动,需要水凝胶具有异质性、周期性和集成性等性质,通过对凝胶结构的设计,可以实现具有可预测路径的特定促动。致动器一般是双层水凝胶,每层具有不同的响应性或机械性质,不同的机械性能或对外部刺激的响应性,双层通常具有不同的溶胀/去溶胀,产生的内应力不同,促使凝胶弯曲或变形,达到仿生运动的效果。Arpita 等<sup>[33]</sup>设计了一种基于巯基的自催化化学反应网络可实现对水凝胶致动器的自主时空调节。致动器由两层组成,第一层是常规聚丙烯酰胺水凝胶,第二层是具有二硫交联的聚丙烯酰胺水凝胶。第一层产生应变,而第二层保持相同的

应变;当凝胶与硫醇接触时,二硫键断裂,第二层软化,第一层恢复其原始形状,释放机械应变,机械驱动将遵循自催化调节。

水凝胶除了被应用于生物传感器、致动器等,还应用于生物探针、健康检测、软体机器人以及人机交互等领域。Shen 等<sup>[33]</sup>将金纳米棒和葡萄糖氧化酶封装到羧甲基壳聚糖/氧化羧甲基纤维素水凝胶中得到了一种用于葡萄糖检测的荧光生物探针,其线性检测范围为  $100\mu\text{mol/L} \sim 5\text{mmol/L}$ ,检测限为  $0.029\text{mmol/L}$ ,涵盖了临床检测中葡萄糖浓度水平。Guo 等<sup>[35]</sup>基于婴儿身体脆弱且无法表达自己的感受,开发了一种可食用摩擦电水凝胶传感器网络,可对婴儿进行全方位的运动检测,具有高灵敏度和高信噪比等优秀特性,响应时间可达  $50\text{ms}$ ,借助深度学习算法,可准确识别婴儿运动模式识别;此外,还开发了一个定制的用户友好的手机应用程序,提供实施警告和一键监护互动,这种自供电的身体区域传感器网络系统为婴儿护理提供了一个有前途的范例。

目前很多应用于可穿戴皮肤和软机器人传感设备的导电水凝胶存在低拉伸性和大滞后性等内在限制,Shen 等<sup>[36]</sup>通过将聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)纳米纤维和聚乙烯醇(PVA)结合 3D 打印和连续冻融得到了一种导电聚合物水凝胶应变传感器,该传感器同时表现出极限应变(300%)和可忽略的滞后( $<1.5\%$ ),系统地表征了应变传感器的整体优越性能,进一步展示了这种应变传感器与电子皮肤的集成和应用,以及对软抓手和工业机器人的远程控制。

## 3 展望

针对医学领域中传统材料的不足,水凝胶以其优异的性能得到了研究者的广泛关注,并且在生物医学领域涉及的范围越来越广。高分子水凝胶作为一种具有 3D 网络结构的新型功能材料,质地柔软、具有生物相容性和生物可降解性,目前已经应用于药物缓释载体、组织工程支架、伤口敷料和生物传感器等领域,有些产品已经应用于临床,但对于有些应用领域的水凝胶材料还存在力学性能较差、组织粘附力弱等不足等缺点,并不能满足需要。在未来的研究中,对水凝胶可以考虑从以下几个方面进行深入研究,(1)水凝胶可以与其他材料复合改性,在提高力学性能的同

时,赋予凝胶导电性等特殊性能,能够更好地应用于医学领域;(2)开发多刺激响应系统,减少对单个刺激源的依赖性;(3)水凝胶还可以结合时下新兴成型技术 3D 打印,制备具有特定性能的水凝胶。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 张圆圆, 杜丽娜, 金义光. 药学报, 2021, 56(05): 1314~1331.
- [ 2 ] Zhao H B, Liu M, Zhang Y J, et al. *Nanoscale*, 2020, 12(28): 14976~14995.
- [ 3 ] 徐旭, 洪昊, 乔鞞华, 等. 华中科技大学学报(医学版), 2022, 51(02): 203~206.
- [ 4 ] 杨航, 熊玉竹, 兰显玉, 等. 化工新型材料, 2022, 50(08): 267~272.
- [ 5 ] Yang Y Y, Xu L F, Wang J F, et al. *Carbohydr. Polym.*, 2022, 283: 119161.
- [ 6 ] 曹文瑞, 刘黎明, 鲁手涛, 等. 工程塑料应用, 2018, 46(03): 151~155.
- [ 7 ] 杨连利, 梁国正. 材料导报, 2007(02): 112~115.
- [ 8 ] Zhang L N, Zuo X Q, Li S J, et al. *Bioact. Mater.*, 2019, 4: 160~166.
- [ 9 ] Hossein D, Babak H, Morteza E, et al. *Mater. Today Commun.*, 2022, 30: 103148.
- [ 10 ] Lei J F, Li X Y, Wang S, et al. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2019, 1(6): 1350~1358.
- [ 11 ] You Y J, Xie Y P, Jiang Z Q. *Biomed. Mater.*, 2019, 14(2): 025010.
- [ 12 ] Chen L L, Qin Y, Cheng J, et al. *RSC Adv.*, 2020, 10(59): 36212~36218.
- [ 13 ] Rahil G, Hamed S-K, Farahnaz F, et al. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2020, 148(C): 434~448.
- [ 14 ] Wei M, Hsu Y, Asoh T, et al. *J. Mater. Chem. B*, 2021, 9(16): 3584~3594.
- [ 15 ] Pertici V, Pin-Barre C, Rivera C, et al, et al. *Biomacromolecules*, 2019, 20(1): 149~163.
- [ 16 ] Dai T J, Wang C P, Wang Y Q, et al. *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2018, 10(17): 15163~15173.
- [ 17 ] Sakr M A, Mohamed M G A, Wu R, et al. *Appl. Clay Sci.*, 2020, 199: 105860.
- [ 18 ] Li Z M, Li G, Xu J J, et al. *Adv. Mater.*, 2022, 34(16): e2109178.
- [ 19 ] Wang S Y, Liu R H, Fu Y, et al. *Expert Opin. Drug Deliv.*, 2020, 17(9): 1289~1304.
- [ 20 ] Zhou Z W, Wang Z F, Liu X J, et al. *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, 2022, 70: 103210.
- [ 21 ] Jo Y-J, Gulfam M, Jo S-H, et al. *Carbohydr. Polym.*, 2022, 286: 119303.
- [ 22 ] Kim Y H, Hu Y L, Jeong J-P, et al. *Carbohydr. Polym.*, 2022, 284: 119195.
- [ 23 ] Suhail M, Ullah H, Vu Q L, et al. *Pharmaceutics*, 2022, 14(10): 2110.
- [ 24 ] Bertsch P, Diba M, Mooney D J, et al. *Chem. Rev.*, 2023, 123(2): 834~873.
- [ 25 ] 徐旭, 洪昊, 乔鞞华, 等. 华中科技大学学报(医学版), 2022, 51(02): 203~206.
- [ 26 ] 黄波, 陈明学, 彭礼庆, 等. 中国组织工程研究, 2022, 26(16): 2480~2486.
- [ 27 ] Chen Z X, Xiao H, Zhang H B, et al. *J. Mater. Chem. B*, 2021, 9: 8646~8658.
- [ 28 ] Ma W D, Dong W Y, Zhao S S, et al. *Mater. Sci. Eng. C*, 2021, 134: 112584.
- [ 29 ] Huang X X, Ma C, Xu Y C, et al. *Ind. Crops Prod.*, 2022, 182: 114945.
- [ 30 ] Dong H F, Wang L Y, Du L, et al. *Small*, 2022, 18(25): 2201620.
- [ 31 ] 冯天琪, 王春丽, 王思瑶, 等. 吉林农业大学学报, 2021, 43(06): 679~684.
- [ 32 ] Wang X M, Xiao Y N, Deng F M, et al. *Biosensors*, 2021, 11(6): 198.
- [ 33 ] Arpita P, Alexander I N, Anton I H, et al. *Adv. Mater.*, 2021, 34(13): e2106816.
- [ 34 ] Shen Y H, Wang Z L, Wang Y C, et al. *Carbohydr. Polym.*, 2021, 274: 118642.
- [ 35 ] Guo R, Fang Y S, Wang Z S, et al. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(35): 2204803.
- [ 36 ] Shen Z Q, Zhang Z L, Zhang N B, et al. *Adv. Mater.*, 2022, 34(32): e2203650.