

纳米技术在白内障防治中的研究进展

周泽明^{1*}, 袁 梦¹, 马 琳¹, 吴利安^{2#}

¹西安医学院研究生院, 陕西 西安

²西安市人民医院(西安市第四医院), 陕西省眼科医院, 西北大学附属人民医院眼科, 陕西 西安

收稿日期: 2026年7月18日; 录用日期: 2026年8月11日; 发布日期: 2026年8月20日

摘 要

在全球范围内, 白内障仍是导致视力损伤与失明的主要病因, 其核心治疗手段仍以超声乳化晶状体摘除联合人工晶状体植入为主。传统手术存在对术后炎症、后发性白内障、角膜内皮损伤及人工晶状体度数测算误差等挑战, 然而, 药物保守治疗因难以突破眼内多种屏障而效果有限。近年来, 纳米技术的发展为白内障诊疗开辟了新思路。基于纳米载体的靶向给药、抗氧化纳米酶、仿生纳米材料以及人工晶状体表面纳米改性等策略, 在增强药物生物利用度、减轻氧化应激、抑制晶状体上皮细胞异常增殖及促进视功能恢复方面展现出独特优势。本文旨在系统综述纳米技术在白内障防治中的最新研究进展, 探讨其机制、优势及转化前景, 以期为眼科精准治疗与新型干预体系的建立提供理论依据与参考。

关键词

白内障, 纳米酶, 纳米粒子, 氧化应激, 晶状体上皮细胞, 纳米技术

Advances in Nanotechnology for Cataract Prevention and Treatment

Zeming Zhou^{1*}, Meng Yuan¹, Lin Ma¹, Li'an Wu^{2#}

¹Graduate School of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Ophthalmology Department, People's Hospital Affiliated to Northwest University, Shaanxi Provincial Eye Hospital, Xi'an People's Hospital (The Fourth Hospital of Xi'an), Xi'an Shaanxi

Received: July 18, 2026; accepted: August 11, 2026; published: August 20, 2026

Abstract

Globally, cataract remains the leading cause of visual impairment and blindness, with phacoe-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周泽明, 袁梦, 马琳, 吴利安. 纳米技术在白内障防治中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(8): 1785-1792. DOI: 10.12677/acm.2026.1682962

multisification combined with intraocular lens (IOL) implantation serving as the primary therapeutic modality. Conventional cataract surgery is confronted with multiple postoperative complications, including inflammatory reactions, posterior capsule opacification, corneal endothelial damage, and refractive errors arising from inaccurate intraocular lens power calculation. Meanwhile, conservative pharmacological therapy yields limited efficacy owing to the formidable intraocular biological barriers that hinder intraocular drug delivery. In recent years, advances in nanotechnology have brought innovative strategies for the diagnosis and treatment of cataracts. Nanomaterial-based approaches, such as targeted drug delivery via nanocarriers, antioxidant nanozymes, biomimetic nanomaterials, and nano-surface modification of intraocular lenses, exhibit distinctive merits in boosting drug bioavailability, alleviating oxidative stress, inhibiting aberrant proliferation of lens epithelial cells, and facilitating the recovery of visual function. This paper systematically reviews the latest research advances of nanotechnology in the prevention and treatment of cataracts, elaborates on underlying mechanisms, prominent advantages and translational prospects, and aims to provide theoretical foundations and references for precision ophthalmic therapy and the construction of novel intervention regimens.

Keywords

Cataract, Nanozyme, Nano Particle, Oxidative Stress, Lens Epithelial Cells, Nanotechnology

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

白内障以晶状体蛋白异常聚集与氧化损伤为病理核心，是全球致盲性眼病的主要原因[1]。目前，超声乳化手术仍是唯一有效的临床手段，但存在创伤风险、术后后发性白内障及医疗资源可及性等问题[2]。尽管部分小分子药物已进入临床阶段，但仍面临递送效率低、稳定性差等问题，纳米技术为其提供了新的解决方案[3]。这一困境的根本原因在于眼部的独特递送屏障[4]。晶状体内部无血管与神经，局部滴眼液受角膜屏障、泪液冲刷及前房快速清除的限制，难以在晶状体部位达到有效治疗浓度。因此，开发能够突破上述障碍的新型递送策略，成为白内障无创治疗的研究焦点。纳米技术的介入为该领域带来了突破性契机[5]。纳米载体显著改善了药物的生物利用度[6]。本文系统评述上述新型纳米技术的设计原理、抗白内障效果及生物相容性，并展望其临床转化前景。

2. 分类

根据催化活性类型及模拟酶种类的不同，用于白内障预防与治疗的纳米酶主要可分为以下几类：具有超氧化物歧化酶模拟活性的纳米酶，如纳米二氧化铈(CeO_2 NPs) [7]和铂纳米颗粒(Pt NPs) [8]，能够催化超氧阴离子歧化为过氧化氢和氧气；具有过氧化氢酶模拟活性的纳米酶，如四氧化三铁纳米颗粒(Fe_3O_4 NPs) [9]和钯纳米颗粒(Pd NPs) [10]，可高效分解过氧化氢为水和氧气；兼具多重抗氧化酶活性的纳米酶，如普鲁士蓝纳米颗粒(PB NPs) [11]及部分锰基纳米材料，可同时模拟超氧化物歧化酶、过氧化氢酶及过氧化物酶的级联反应[12]，实现对多种活性氧的协同清除。此外，少数纳米酶还表现出谷胱甘肽过氧化物酶模拟活性，能够协同还原型谷胱甘肽清除脂质过氧化物[13]。上述不同催化特性的纳米酶为根据白内障不同病理阶段的氧化应激特征进行针对性设计提供了丰富的材料基础。

3. 机制

纳米酶治疗白内障的核心在于利用其类酶催化活性, 逆转或阻止晶状体蛋白的异常聚集, 进而恢复晶状体透明度[14]。清除活性氧以阻断氧化损伤链[15], 白内障形成的关键始动因素之一是晶状体内活性氧的过度累积[16]。纳米酶能够模拟超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的级联催化反应: 超氧化物歧化酶模拟活性将超氧阴离子快速歧化为过氧化氢和氧气, 而过氧化氢酶模拟活性则进一步将过氧化氢分解为水和氧气。这一过程有效清除了两种主要的致病性活性氧, 降低了晶状体内部的氧化应激水平, 从而阻止新的蛋白氧化交联及聚集体的形成[17]。保护晶状体上皮细胞的功能完整性, 晶状体上皮细胞的氧化损伤会触发细胞凋亡及异常的上皮-间充质转化, 后者是后发性白内障及皮质性白内障进展的重要机制[18]。纳米酶能够穿透细胞膜或定位于细胞表面, 清除线粒体及胞质内过量活性氧[19]。抗菌, 纳米酶应用于白内障术后的抗菌。纳米酶绕过传统“靶点突变/外排泵/生物膜屏障”的一条非抗生素式破局路径: 用材料本身的酶模拟催化活性(尤其产/调控 ROS、降解生物膜基质、淬灭群体感应)来杀死或瓦解耐药菌/生物膜/胞内菌[20]。

4. 应用

4.1. 抗氧化

在白内障中, 氧化应激起着重要作用。它通过破坏晶状体中的蛋白质、脂质和核酸等生物大分子来破坏抗氧化防御系统的平衡, 诱发晶状体不透明, 然后导致白内障的形成[21]。Chen 等人[22]设计了一个含有白藜芦醇(RGNP)的金纳米颗粒纳米系统, 有抑制过氧化氢介导的氧化应激损伤的优越能力, 包括透镜上皮细胞中活性氧(ROS)的产生、丙二醛(MDA)的生成和谷胱甘肽(GSH)的消耗。此外, 在大鼠白内障模型中, RGNP 还可以明显缓解硒酸钠诱导的晶状体不透明度。(手术 + 纳米酶的策略)后囊膜混浊(PCO)是白内障手术后最常见的并发症, 但其仅验证了短期细胞毒性和短期体内药效, 未考察 RGNPs 的长期体内蓄积、潜在器官毒性(尤其是金纳米粒的长期代谢、视网膜安全性), 也未评估多次给药后的免疫反应。Hong 等人[23]报道了一种新型人工晶状体(IOL)整体材料, 这种功能化 IOL 整体材料在短期内能有效去除囊袋内残留的人晶状体上皮细胞(HLECs), 并且通过近红外光(NIR)照射可在长期内需预防 PCO, 当前报道的 AuNPs@MIL-PGE 人工晶状体虽实现了级联反应与光热协同防 PCO 的创新, 但其长期眼内安全性数据缺失, 光热操控的临床转化壁垒未破, 且未回应复杂眼内环境对级联效率的干扰, 更缺乏与主流防 PCO 策略的对照证据, 难以支撑临床落地。Wang 等人[24]通过使表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)与锌离子配位, 形成了一种 pH 与 ROS 双刺激响应型抗氧化纳米颗粒(EGCG-Zn)。体外试验中, 维生素 E 类似物 Trolox 为参考标准, EGCG-Zn 和 EGCG 的总抗氧化能力均可达到 Trolox 的约 60 倍。令人可喜的是, Zn^{2+} 在利用 EGCG 羟基进行配位时, 不仅不影响 EGCG 的抗氧化能力, 反而使其略有提高。在 UV-B 诱导的大鼠白内障动物模型中, EGCG-Zn 具有良好的体内安全性, 使用 EGCG-Zn 的实验组晶状体的透明度明显低于未处理的模型组, 尽管 EGCG-Zn NPs 在 UV-B 模型中展现多靶点抗氧化潜力, 但其长期眼内安全性、慢病模型普适性及临床级滴眼制剂工艺仍待突破, 尚难替代手术。Gao 的团队[17]研究了铁姜黄素纳米酶通过靶向细胞衰老和氧化损伤来延缓年龄相关性白内障进展的治疗潜力。体外实验显示, 铁-姜黄素纳米酶显著降低了 H_2O_2 处理的晶状体上皮细胞中的活性氧(ROS)水平, 减轻了细胞衰老, 并减少了细胞凋亡, 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)的水平也明显增加。在体内, 铁姜黄素纳米酶处理有效地延迟了大鼠白内障的发展。从机制上讲, 纳米酶通过调节 p53/p21/BAX 信号轴来抑制衰老和细胞凋亡, 主要是通过降低 p53 表达和磷酸化水平。Al-Bassam 等人[25]评估了包覆有 D- α -生育酚聚乙二醇琥珀酸酯的硒纳米颗粒(SeNPs)在人晶状体上皮(HLE)细胞中

的抗氧化活性,显示出针对晶状体相关氧化损伤的非侵入性策略的前景,包括白内障预防,TPGS-SeNPs虽在HLE中证实可通过GPx/TrxR双节点选择性增强抗氧化防御,但其窄安全窗、储存长大趋势及缺乏在体眼模型验证,尚不足以支撑临床滴眼转化,需向复合抗氧化/缓释滴眼体系推进。总之,纳米颗粒有望成为白内障治疗领域的重要手段,为许多白内障患者恢复清晰的视力带来希望,但目前临床落地还有困难。

4.2. 抗菌

白内障本身不会直接引发细菌感染,因为它属于晶状体蛋白质变性导致的混浊,与病原体无关。不过,在白内障手术后或合并其他眼部疾病时,可能因外部因素(如手术切口、外伤、卫生不佳)引发细菌感染[26]。白内障术后最常见的致病菌是凝固酶阴性葡萄球菌,其中以表皮葡萄球菌为代表[27]。这类细菌是正常人眼表结膜囊的优势定植菌群,手术过程中随房水流出或器械操作进入眼内,是导致术后感染性眼内炎最主要的原因,约占分离菌株的40%~60%。由于传统抗生素的局限性,如频繁给药引起的耐药性和全身毒性,需要紧急治疗开发。Wang等人[28]开发了一个注射抗生素纳米酶水凝胶仓库(ANHD),由此产生的分层复合材料表现出多种功能协同效应,包括抗菌活性、活性氧种类($O_2^-/H_2O_2/\cdot OH$)清除活性、促进角膜伤口愈合和加强角膜机械强度。此外,纳米酶和水凝胶在角膜基质中无处不在,可以在不渗透角膜表面的情况下发挥其功能,这将它们与眼药水配方区分开来。在鼠模型中,单次向角膜基质注射ANHD有效治疗了耐药性表皮葡萄球菌角膜炎,完全根除细菌,显著减少炎症,并加速上皮修复。这些结果证明了ANHD在治疗眼部传染病方面的潜力。目前可用的纳米酶缺乏足够的催化活性及穿透细菌生物膜的能力,这限制了其在治疗细菌性角膜炎方面的疗效,Wang的团队[29]将铜单原子纳米酶(Cu-SAzymes)和氨基化右旋糖酐(Dex-NH₂)负载于ZnFe层状双氢氧化物(ZnFe-LDH)纳米片上,从而制备出具有过氧化物酶(POD)、氧化酶(OXD)和过氧化氢酶(CAT)样催化活性的纳米酶DT-ZnFe-LDH@Cu,该纳米酶具有过氧化物酶(POD)、氧化酶(OXD)和过氧化氢酶(CAT)样催化活性。这使得该纳米酶能够利用过氧化氢(H_2O_2)产生活性氧(ROS),例如羟基自由基($\cdot OH$)、超氧阴离子自由基(O_2^-)和单线态氧(1O_2),从而杀死引起感染的细菌。表面上的Dex-NH₂使DT-ZnFe-LDH@Cu能够穿透生物膜,并吸附在生物膜中细菌产生的胞外聚合物(EPS)上。此外,在BK兔模型中,DT-ZnFe-LDH@Cu成功修复了铜绿假单胞菌感染引起的角膜损伤,其效果优于市售的妥布霉素眼药水,DT-ZnFe-LDH@Cu虽以多酶协同与生物膜穿透在兔BK中超越妥布霉素,但其外源 H_2O_2 依赖、397 nm粒径的眼内穿透边界及>1月眼内安全数据缺失,尚处动物概念验证阶段,距临床滴眼制剂仍有制剂工艺与长期安全鸿沟。Tian的团队[30]制备了没食子酸-铜配位聚合物Cu-GA纳米棒/纳米酶,其在酸性微环境中表现出过氧化物酶(POD)样与谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)样活性,可催化 H_2O_2 产生活性氧并耗竭GSH,从而破坏细菌膜/蛋白并高效清除MRSA/*E. coli*;而在近中性条件下转为以超氧化物歧化酶(SOD)样为主的抗氧化模式,清除ROS/RNS、下调IL-1 β /TNF- α ,并促进HIF-1 α /VEGF/CD31相关血管新生与胶原沉积。小鼠MRSA感染创面模型中Cu-GA(尤其联合 H_2O_2)显著加快创面闭合且未显现明显全身毒性,展现了“微环境响应型多酶仿生活性”用于感染创面协同抗菌、促愈合的潜力,Cu-GA虽以pH响应三重酶活实现感染伤口杀菌-抗氧化-促血管一体化,但其外源 H_2O_2 依赖、成熟生物膜穿透力未证及>4周Cu²⁺蓄积安全数据缺失,仍处小动物概念验证阶段,需向自供ROS敷料与慢性伤口模型推进。

4.3. 抗炎

慢性炎症可能引发晶状体的浑浊,术后往往伴随着炎症反应,感染引起的细菌性炎症反应。Jiang等人[31]开发了一种Fe-姜黄素纳米酶,其中天然抗氧化剂与Fe³⁺协调,形成具有优异溶解度的纳米颗粒,

用于引导抗炎和 ROS 清除作用来治疗 EAU。自由基清除实验表明，纳米酶在低浓度下降低了自由基的水平。体外和体内实验显示，用铁-姜黄素纳米酶治疗组的炎症反应和 ROS 水平低于对照组，这反映在几种关键炎症细胞因子(如 IFN- γ 、IL-17 和 TNF- α)水平的下调；减少 H₂O₂ 释放；抑制 Th1 和 Th17 细胞的增殖；以及减轻眼睛的病理变化。重要的是，使用普鲁士蓝染色在视网膜中检测到铁-姜黄素纳米酶。此外，Fe-姜黄素纳米酶在引导这些生物活性时是无细胞毒性的，Fe-curcumin 纳米酶虽在 EAU 中证实“抗氧化+Th1/Th17 抑制”双效且视网膜可定位，但其口服眼内递送效率未证、对照缺失及分子机制停留在细胞因子层，尚处动物概念验证阶段，需向局部滴眼制剂与慢性复发模型推进。Wang 等人[32]开发了一种活性药物成分(API)纳米酶(PC-DS NE)，实现了双氯芬酸钠的短期释放和原花青素的持续释放。值得注意的是，PC-DS NE 具有良好的生物相容性、自级联氧化还原调节能力和显著的抗炎活性。在角膜碱性烧伤实验中，PC-DS NE 通过清除活性氧种、抑制炎症细胞因子和促血管生成因子的表达以及下调铁血瘤来有效抑制角膜新生血管化，PC-DS NE 虽以 API 配位策略实现抗氧化-抗炎-铁死亡三元协同并在碱烧伤 CNV 中优于地塞米松，但其铁死亡证据间接、>4 周 Fe²⁺眼内安全未证及缺乏慢性/感染性 CNV 模型验证，仍处小动物概念验证阶段，需向缓释滴眼制剂与多病因 CNV 队列推进。Qiao 等人[33]报告了一种简单、环保、一步合成的超小铜 Cu_{5.40} 纳米颗粒(NPs)作为眼药水配方中的抗氧化剂和抗炎纳米酶。Cu_{5.40} NPs 表现出很强的过氧化氢(H₂O₂)清除能力，并降低了体外角膜细胞的细胞内 ROS。在小鼠 H₂O₂ 诱导的角膜氧化损伤模型中，Cu_{5.40} NPs 滴眼液有效地清除 ROS 并减少炎症，从而提供防止氧化损伤并促进上皮再生。纳米技术在白内障病理过程中的干预靶点如图 1 所示。



Figure 1. Target of nanotechnology in pathological process of cataract
图 1. 纳米技术在白内障病理过程中的靶点

5. 眼用纳米药物治疗白内障的挑战

尽管纳米技术在白内障防治中展现出巨大潜力，但从临床前研究迈向临床应用仍面临一系列的挑战。

5.1. 眼内长期生物安全性评价

眼球作为相对封闭的免疫豁免器官，纳米材料的长期滞留与代谢行为尤为关键。纳米药物的潜在毒性主要包括氧化应激、线粒体功能障碍、染色体异常、脂质过氧化、DNA 损伤和细胞周期改变等[34]。纳米颗粒还可能触发免疫反应，破坏眼内的免疫豁免状态，导致葡萄膜炎或眼压升高等不良事件[35]。

5.2. 纳米药物针对晶状体的靶向递送策略

PENE 修饰的脂质体-晶状体上皮外泌体杂化囊泡，以外泌体膜整合素实现晶状体上皮同源靶向、PENE 阳离子端短暂开放角膜紧密连接并借 RR 位点递药至线粒体，形成“晶状体-线粒体”双级靶向，在 UVB 大鼠中维持晶状体透亮。但该策略凸显了晶状体靶向的核心挑战：外泌体规模化提取/批间差与膜蛋白保留率难控；PENE 正电荷虽促穿透，却可能扰动角膜上皮屏障稳态；双级靶向仅在氧化应激性皮质白内障验证，对年龄相关性白内障及灵长类晶状体囊下穿透效力未明，距临床转化仍远[36]。

5.3. 纳米制剂在眼部药代动力学

纳米制剂在眼部作用的药代动力学研究面临的核心挑战包括：眼部多重屏障导致的低生物利用度与靶向组织暴露不足、玻璃体/视网膜界面的扩散与清除机制复杂、动物模型与人体差异造成的转化困难，以及缺乏标准化的体内示踪与定量方法；此外，纳米颗粒的理化属性(粒径、电荷、表面修饰)轻微改变即可显著改变其眼内分布与清除，使得制剂优化与质量控制难度加大[37]。

5.4. 满足眼科用药标准的纳米制剂生产与质量控制难题

眼用纳米乳的规模化生产与质量控制面临多重挑战：生产端，低能乳化法操作简便但难以工业化放大；高能法可实现量产，但工艺参数(压力、循环次数、温度)对乳滴粒径与制剂稳定性影响显著，过程产热限制热敏药物应用，规模放大后剪切力差异易引发质量波动。质控端，无菌制备难度大，终端过滤与热灭菌易破坏乳滴结构，且缺乏统一的体内外评价与质量管控标准[38]。

6. 小结与展望

纳米技术的介入为白内障的预防与治疗开辟了突破传统药物瓶颈的新路径。本文系统综述了基于纳米载体的药物递送系统、具有内在活性的纳米酶在该领域的研究进展。然而，该领域仍处于临床前探索阶段。现有研究多集中于体外细胞实验及小型动物模型(如大鼠、小鼠)，缺乏大动物长期安全性及有效性数据；纳米材料的眼内代谢途径、长期蓄积毒性及潜在的免疫原性尚未明晰；此外，不同研究中纳米材料的剂量、给药频率及疗效评价标准尚未统一，限制了结果间的可比性。基于当前进展与不足，未来研究可从以下几个方向重点突破：一是开发多靶点协同纳米平台，单一的抗氧化或蛋白复性作用可能难以应对复杂多因素的白内障病理过程。设计集活性氧清除、蛋白聚集解聚、抗炎及自噬调节于一体的多功能纳米体系，有望实现更高效的防治效果。二是提升晶状体靶向特异性，目前多数纳米载体仍依赖被动靶向。通过偶联晶状体特异性配体(如抗晶状体囊膜抗体或穿透肽)，可增强药物在晶状体的主动富集，减少对眼内其他组织的非特异性暴露。三是推动大动物及长期安全性评价，在兔、猕猴等大动物白内障模型中开展系统的药效学与毒理学研究，重点关注纳米材料在眼内组织的分布、代谢动力学及慢性毒性(如视网膜毒性、炎症反应)，为临床转化提供可靠依据。四是探索联合治疗与个体化策略，结合纳米技术与

其他物理手段(如微针、离子导入)或基因治疗,形成序贯或协同方案;同时依据白内障的不同病因(年龄相关性、糖尿病性、先天性)及分期,开发个体化的纳米制剂。五是关注临床转化可行性设计,在纳米材料设计初期即考虑规模化生产、稳定性、无菌制剂的制备工艺及成本效益,推动实验室成果向滴眼液、眼用凝胶或缓释植入物等可临床应用的剂型转化。

参考文献

- [1] Li, M., Jia, W., Song, J., Ma, J., Zhou, Y., Han, Y., *et al.* (2025) Global Prevalence and Years Lived with Disability (YLDs) of Cataract in 204 Countries and Territories: Findings from the Global Burden of Disease Study 2021. *Eye*, **39**, 1737-1743. <https://doi.org/10.1038/s41433-025-03743-z>
- [2] Cicinelli, M.V., Buchan, J.C., Nicholson, M., Varadaraj, V. and Khanna, R.C. (2023) Cataracts. *The Lancet*, **401**, 377-389. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(22\)01839-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)01839-6)
- [3] Li, S., Chen, L. and Fu, Y. (2023) Nanotechnology-Based Ocular Drug Delivery Systems: Recent Advances and Future Prospects. *Journal of Nanobiotechnology*, **21**, Article No. 232. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01992-2>
- [4] Yavuz, B. and Kompella, U.B. (2017) Ocular Drug Delivery. In: Whitcup, S.M. and Azar, D.T., Eds., *Pharmacologic Therapy of Ocular Disease*, Springer International Publishing, 57-93. https://doi.org/10.1007/164_2016_84
- [5] Chen, Y., Ye, Z., Chen, H. and Li, Z. (2024) Breaking Barriers: Nanomedicine-Based Drug Delivery for Cataract Treatment. *International Journal of Nanomedicine*, **19**, 4021-4040. <https://doi.org/10.2147/ijn.s463679>
- [6] Ahmed, S., Amin, M.M. and Sayed, S. (2023) Ocular Drug Delivery: A Comprehensive Review. *AAPS PharmSciTech*, **24**, Article No. 66. <https://doi.org/10.1208/s12249-023-02516-9>
- [7] Zhou, X., Zhou, Q., He, Z., Xiao, Y., Liu, Y., Huang, Z., *et al.* (2024) ROS Balance Autoregulating Core-Shell CeO(2)@ZIF-8/Au Nanoplatfor for Wound Repair. *Nano-Micro Letters*, **16**, Article No. 156. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01353-0>
- [8] Bardi, G., Boselli, L. and Pompa, P.P. (2023) Anti-Inflammatory Potential of Platinum Nanozymes: Mechanisms and Perspectives. *Nanoscale*, **15**, 14284-14300. <https://doi.org/10.1039/d3nr03016d>
- [9] You, W., Cai, Z., Xiao, F., Zhao, J., Wang, G., Wang, W., *et al.* (2025) Biomolecular Microneedle Initiates Fe(3)O(4)/MXene Heterojunction-Mediated Nanozyme-Like Reactions and Bacterial Ferroptosis to Repair Diabetic Wounds. *Advanced Science*, **12**, e2417314. <https://doi.org/10.1002/advs.202417314>
- [10] Fang, Y., Liu, Y., Tang, Z., Zhang, Z., Yang, X., Li, X., *et al.* (2026) Palladium-Based Nanozymes: From Synthesis and Activity Modulation to Biomedical Applications. *Chemistry—A European Journal*, **32**, e03589. <https://doi.org/10.1002/chem.202503589>
- [11] Estelrich, J. and Busquets, M.A. (2021) Prussian Blue: A Nanozyme with Versatile Catalytic Properties. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**, Article No. 5993. <https://doi.org/10.3390/ijms22115993>
- [12] Zhao, H., Shao, W., Jiang, M., Chen, F., Li, Y., Zhang, X., *et al.* (2026) Spatiotemporal NO/O(2)-Releasing Cascade Nanozyme Microneedles Enhance Diabetic Infected Wound Healing by Modulating the Immune Microenvironment. *Theranostics*, **16**, 2811-2828. <https://doi.org/10.7150/thno.123827>
- [13] Zeng, J., Ding, C., Chen, L., Yang, B., Li, M., Wang, X., *et al.* (2023) Multienzyme-Mimicking Au@Cu(2)O with Complete Antioxidant Capacity for Reactive Oxygen Species Scavenging. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 378-390. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c16995>
- [14] Xie, H., Wang, Y., Wang, J., Xu, Z., Weng, C. and Lin, Q. (2026) A Regenerative Cerium Oxide Nanozyme for Cataract Treatment via Oxidative Stress Regulation. *Biomaterials Science*, **14**, 3295-3312. <https://doi.org/10.1039/d6bm00331a>
- [15] Abukhaled, Y. (2025) Reactive Oxygen Species and Oxidative Stress in Ocular Disease: From Molecular Mechanisms to Targeted Therapies. *Medical Hypothesis Discovery and Innovation in Ophthalmology*, **14**, 136-145. <https://doi.org/10.51329/mehdiophthal1527>
- [16] Subczynski, W.K., Pasenkiewicz-Gierula, M. and Widomska, J. (2023) Protecting the Eye Lens from Oxidative Stress through Oxygen Regulation. *Antioxidants*, **12**, Article No. 1783. <https://doi.org/10.3390/antiox12091783>
- [17] Gao, X., Li, K., Huang, Y., Long, Z., Xiang, Y., Zheng, W., *et al.* (2025) Fe-Curcumin Nanozymes-Mediated Reactive Oxygen Species Scavenging and Anti-Apoptotic Effects on Age-Related Cataracts. *Materials Today Bio*, **32**, Article ID: 101850. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101850>
- [18] Wang, Y., Cao, K., Li, M. and Wan, X. (2025) Posterior Capsular Opacification: Pathogenesis, Challenges, and Innovative Therapeutic Strategies. *Experimental Eye Research*, **259**, Article ID: 110585. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2025.110585>
- [19] Hanafy, B.I., Cave, G.W.V., Barnett, Y. and Pierscionek, B.K. (2021) Nanoceria Prevents Glucose-Induced Protein

- Glycation in Eye Lens Cells. *Nanomaterials*, **11**, Article No. 1473. <https://doi.org/10.3390/nano11061473>
- [20] Xie, L., Wu, H., Li, Y., Shi, L. and Liu, Y. (2025) Recent Development of Nanozymes for Combating Bacterial Drug Resistance: A Review. *Advanced Healthcare Materials*, **14**, e2402659. <https://doi.org/10.1002/adhm.202402659>
 - [21] Lee, B., Afshari, N.A. and Shaw, P.X. (2024) Oxidative Stress and Antioxidants in Cataract Development. *Current Opinion in Ophthalmology*, **35**, 57-63. <https://doi.org/10.1097/icu.0000000000001009>
 - [22] Chen, Q., Gu, P., Liu, X., Hu, S., Zheng, H., Liu, T., *et al.* (2022) Gold Nanoparticles Encapsulated Resveratrol as an Anti-Aging Agent to Delay Cataract Development. *Pharmaceutics*, **16**, Article No. 26. <https://doi.org/10.3390/ph16010026>
 - [23] Hong, Y., Fang, Q., Bai, T., Zhao, P., Han, Y. and Lin, Q. (2023) Cascade Reaction Triggering and Photothermal AuNPs@MIL MOFs Doped Intraocular Lens for Enhanced Posterior Capsular Opacification Prevention. *Journal of Nanobiotechnology*, **21**, Article No. 134. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01897-0>
 - [24] Wang, J., Zhang, R., Xie, H., Yang, Y., Chen, H. and Lin, Q. (2025) Metal-Phenolic Epigallocatechin Gallate-Zinc Antioxidant Nanoparticles for Cataract Treatment. *Journal of Controlled Release*, **383**, Article ID: 113798. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2025.113798>
 - [25] Al-Bassam, L., Naiyer, M.M., Morris, C.J., Brocchini, S. and Williams, G.R. (2025) Selenium Nanoparticles: Synthesis, Stability and *in Vitro* Evaluation in Human Lens Epithelial Cells. *Pharmaceutics*, **17**, Article No. 1157. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17091157>
 - [26] Peck, T.J., Patel, S.N. and Ho, A.C. (2021) Endophthalmitis after Cataract Surgery: An Update on Recent Advances. *Current Opinion in Ophthalmology*, **32**, 62-68. <https://doi.org/10.1097/icu.0000000000000727>
 - [27] Yang, Y., Lin, J., Li, Y., Ding, X., Liu, M., Zeng, J., *et al.* (2024) Comparison of the Aetiology, Microbiological Isolates and Antibiotic Susceptibilities of Endophthalmitis between Children and Adults in Southern China: A Retrospective, Cohort Study. *BMJ Open*, **14**, e085021. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-085021>
 - [28] Wang, H., Liu, Y., Ma, L., Sun, X., Li, N., Sui, X., *et al.* (2026) Antibiotic Nanozyme Hydrogel Depot for Single-Injection MDR Bacterial Keratitis Therapy via Localized Antibacterial, Pro-Healing and Corneal Reinforcement. *Materials Today Bio*, **36**, Article ID: 102602. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.102602>
 - [29] Wang, K., Yuan, M., Dai, P., Li, J., Tao, A., Zhang, X., *et al.* (2025) ZnFe Layered Double Hydroxide Nanosheets Loaded with Cu Single-Atom Nanozymes with Multi-Enzyme-Like Catalytic Activities as an Effective Treatment for Bacterial Keratitis. *Advanced Science*, **12**, e2411999. <https://doi.org/10.1002/adv.202411999>
 - [30] Tian, H., Yan, J., Zhang, W., Li, H., Jiang, S., Qian, H., *et al.* (2023) Cu-GA-Coordination Polymer Nanozymes with Triple Enzymatic Activity for Wound Disinfection and Accelerated Wound Healing. *Acta Biomaterialia*, **167**, 449-462. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.05.048>
 - [31] Jiang, Z., Liang, K., Gao, X., Cao, F., An, G., Gui, S., *et al.* (2023) Fe-Curcumin Nanozyme-Mediated Immunosuppression and Anti-Inflammation in Experimental Autoimmune Uveitis. *Biomaterials Research*, **27**, Article No. 131. <https://doi.org/10.1186/s40824-023-00451-1>
 - [32] Wang, H., Yang, Y., Yu, H., Ma, L., Qi, X., Qu, J., *et al.* (2025) Self-Cascade API Nanozyme for Synergistic Anti-Inflammatory, Antioxidant, and Ferroptosis Modulation in the Treatment of Corneal Neovascularization. *Small*, **21**, e2407751. <https://doi.org/10.1002/smll.202407751>
 - [33] Qiao, R., Yang, L., Zhang, S., Qian, M., Lu, Y., Bai, H., *et al.* (2025) Ultrasmall Copper-Based Nanozyme Eye Drops for Effective Antioxidative Therapy of Ocular Surface Diseases. *ACS Omega*, **10**, 26478-26487. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00103>
 - [34] Xie, G., Lin, S., Wu, F. and Liu, J. (2023) Nanomaterial-Based Ophthalmic Drug Delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **200**, Article ID: 115004. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2023.115004>
 - [35] Mahaling, B., Baruah, N. and Dinabandhu, A. (2024) Nanomedicine in Ophthalmology: From Bench to Bedside. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article No. 7651. <https://doi.org/10.3390/jcm13247651>
 - [36] Zhang, R., Li, W., Wang, J., Li, Y., Chen, J., Hong, W., *et al.* (2026) Cell-Penetrating Peptide-Functionalized Biomimetic Nanovesicles for Efficient Cataract Treatment via Enhanced Corneal Penetration and Lens-Mitochondria Dual Targeting. *Bioactive Materials*, **57**, 305-322. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.11.016>
 - [37] Shahrer, R.A. and Fouda, A.Y. (2025) Recent Advances and Future Challenges in Nanosystems for Ocular Drug Delivery. *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, **392**, Article ID: 103738. <https://doi.org/10.1016/j.jpvet.2025.103738>
 - [38] Gawin-Mikolajewicz, A., Nartowski, K.P., Dyba, A.J., Gołkowska, A.M., Malec, K. and Karolewicz, B. (2021) Ophthalmic Nanoemulsions: From Composition to Technological Processes and Quality Control. *Molecular Pharmaceutics*, **18**, 3719-3740. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.1c00650>