

引用:张秋凤,付仕祺,黄现强,等. 多金属氧酸盐生物活性研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026,39(5): 815-822.

Citation: Zhang Qiufeng, Fu Shiqi, Huang Xianqiang, Shi Fumei. Research progress on the biological activities of polyoxometalates[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(5): 815-822.

文章编号 1672-6634(2026)05-0815-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2026010014

多金属氧酸盐生物活性研究进展

张秋凤¹, 付仕祺², 黄现强², 侍福梅¹

(1. 聊城大学 农业与生物学院, 山东 聊城 252059; 2. 聊城大学 化学化工学院, 山东 聊城 252059)

摘要 多金属氧酸盐(Polyoxometalates, POMs)是一类由过渡金属氧化物阴离子构筑的金属-氧簇合物,具备可精准调控的空间网络结构、优异的物理化学性能与可逆氧化还原特性,在催化、材料科学、储能、医学及生物学等领域展现出巨大应用潜力。本文系统综述 POMs 在生物医学领域的研究进展,重点阐述其抗菌、抗病毒、抗癌等生物活性及作用机制,并展望其在纳米技术、基因编辑靶向给药、光热-化学动力学联合疗法等前沿方向的应用前景,旨在为多金属氧酸盐的生物医学基础研究与转化应用提供科学参考。

关键词 多金属氧酸盐; 生物活性; 抗肿瘤; 药物递送; 作用机制

中图分类号 O641.4

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress on the biological activities of polyoxometalates

ZHANG Qiufeng¹, FU Shiqi², HUANG Xianqiang², SHI Fumei¹

(1. College of Agriculture and Biology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Polyoxometalates (POMs) are a class of metal-oxygen cluster compounds constructed from transition metal oxide anions, featuring precisely tunable spatial network structures, excellent physico-chemical properties, and reversible redox characteristics. They have shown great application potential in fields such as catalysis, materials science, energy storage, medicine, and biology. This article systematically reviews the research progress of POMs in the biomedical field, focusing on their biological activities such as antibacterial, antiviral, and anticancer properties, as well as their mechanisms of action. It also looks forward to their application prospects in cutting-edge directions such as nanotechnology, gene editing targeted drug delivery, and photothermal-chemodynamic combined therapy, aiming to provide scientific references for the basic research and translational application of polyoxometalates in biomedicine.

Keywords polyoxometalates; biological activity; anti-tumor; drug delivery; mechanism of action

0 引言

多金属氧酸盐(Polyoxometalates, POMs)是由前过渡金属(Mo, W, V, Nb, Ta 等)与氧原子通过配位键连接而形成的一类具有结构独特、性质优异的无机金属-氧簇合物^[1]。凭借独特的拓扑结构、可调的氧化还

收稿日期:2026-01-26

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021MC017);山东省研究生教育与教学改革重点项目(SDYJG21047)资助

通信作者:侍福梅,女,汉族,博士,教授,研究方向:生物防治, E-mail: shifumei@126.com。

原性能、可控电荷分布与高热稳定性, POMs 在多学科交叉领域展现出多元化应用价值, 除生物医药赛道外, 在催化、材料科学、能量储存等核心领域同样具备不可替代的研究意义与应用潜力。在催化领域, POMs 兼具强酸性与氧化还原双活性位点, 结构可精准调控, 兼具均相催化高效性与多相催化易分离回收优势, 在光催化、电催化、选择性有机氧化、环境污染物降解、能源小分子转化等反应中表现出优异催化活性与循环稳定性, 是绿色催化体系的核心候选材料^[2-4]。依托结构可修饰、组分可调控的特性, POMs 在材料科学领域同样应用广泛, 既可作为无机构筑单元参与金属有机框架、超分子组装体、有机-无机杂化材料等新型功能材料的构筑, 也可用于制备光电材料、质子传导材料、磁性材料、传感材料, 实现材料光、电、磁、吸附等多功能集成, 为先进功能材料研发提供了全新设计思路^[5-6]。在能量储存与转化领域, POMs 具备可逆多电子氧化还原特性、高质子电子传输能力与结构稳定性, 在二次电池、超级电容器、光电水解制氢、二氧化碳还原储能等体系中应用广泛, 既能作为电极活性材料提升储能容量与循环寿命, 也可作为氧化还原介质优化能量转化效率, 助力高效清洁能源存储器件研发^[2,7-8]。与此同时, POMs 在生物应用中存在的生物相容性不足、生理环境稳定性差、潜在长期毒性等问题, 已通过结构修饰与纳米复合技术得到显著改善^[9-10]。本文系统梳理 POMs 的抗菌、抗病毒、抗癌等生物活性, 深入剖析其构效关系与作用机制, 并展望未来发展方向, 为多金属氧酸盐的生物医学研究与新药研发提供思路。

1 多金属氧酸盐(POMs)的分类与结构特性

POMs 按其化学组成可分为同多金属氧酸盐(Isopolyoxometalates)和杂多金属氧酸盐(Heteropolyoxometalates)两大类。同多金属氧酸盐由单一金属氧单元通过氧桥聚合形成, 不含杂原子, 典型代表如同多钼酸盐 $[\text{Mo}_6\text{O}_{19}]^{2-}$ 、同多钨酸盐 $[\text{W}_6\text{O}_{19}]^{2-}$ 、同多钒酸盐 $[\text{V}_{10}\text{O}_{28}]^{6-}$ 等, 是理解多酸自组装规律的基础体系^[11]。

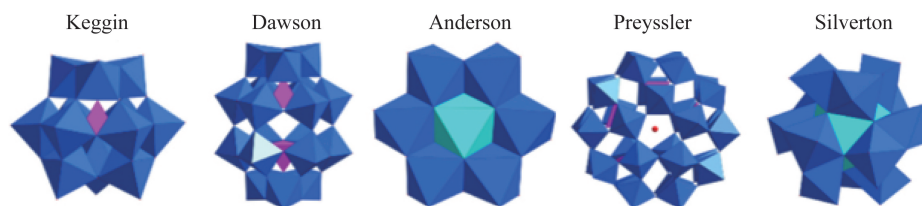


图 1 多金属氧酸盐的典型结构多面体示意图^[14]

Fig. 1 Polyhedral Representation of Typical Polyoxometalate Structures^[14]

杂多金属氧酸盐(Heteropolyoxometalates)由 P、Si、Ge 等杂原子与 Mo、W、V 等多原子共同缩合而成, 结构丰富、应用广泛, 代表化合物如磷钼酸($\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$)与磷钨酸($\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$)等^[12]。已报道的经典结构包括 Keggin、Dawson、Anderson 等类型, 其中 α -Keggin 结构稳定性高、电子性质独特, 是生物活性研究中最常用的骨架^[13]。POMs 的分类与典型结构见图 1。

POMs 的基本构建单元是金属氧多面体(Mo_6 八面体或 Mo_4 四面体), 通过共角、共边或共面连接形成多维骨架, 赋予 POMs 优异的催化活性与电子传递能力, 使其应用前景可期^[15]。POMs 结构具有高度可设计性, 可通过调控金属种类、配体环境、有机配体修饰等方式优化其物理化学性能, 适配不同生物应用场景^[16]。同时, 其良好的热稳定性、化学稳定性与溶解性, 使其成为极具潜力的候选生物活性材料(图 2)。

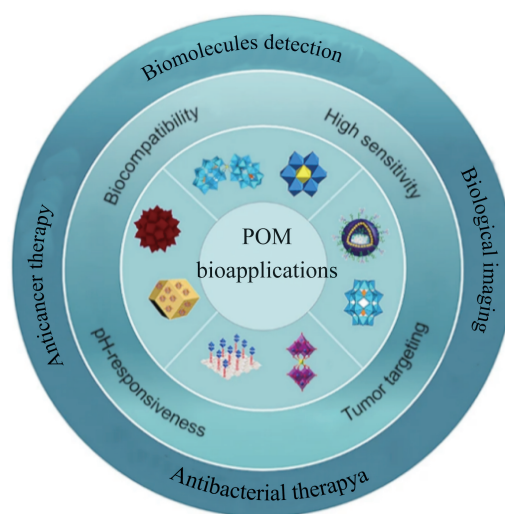


图 2 多金属氧酸盐在生物医疗方向的应用示意图^[17]

Fig. 2 Schematic diagram of the application of polyoxometalates in biomedical field^[17]

2 多金属氧酸盐(POMs)的生物活性

POMs 的生物活性和作用机制与其结构类型、金属中心、配位环境密切相关,呈现显著构效关系。Keggin 型 POMs 因高负电荷密度与强氧化还原活性,在抗病毒与抗肿瘤研究中表现突出^[12]。研究表明,以 $[\text{V}_4\text{O}_{12}]^{4-}$ 为核心的四钒氧簇,因配位金属离子(Ni^{2+} 和 Mn^{2+})不同,对人肝癌 HepG2 细胞的凋亡抑制活性存在明显差异^[18]。通过引入氨基酸、咪唑等有机配体或 Ag^+ 、 Cu^{2+} 等金属离子构建有机-无机杂化 POMs,可进一步提升结构稳定性、生物分子亲和性与靶向性,从而增强生物活性^[19]。POMs 的典型结构与 POMs 的生物活性和作用机制的关系参见表 1。

表 1 多金属氧酸盐典型结构及其作用机制

Tab. 1 Polyoxometalates typical structures and mechanisms of action

多酸类型	代表性 POMs	核心原子 / 配体	作用机制	生物活性特点	参考文献
Keggin 型	$\text{H}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$	Si, W	抑制逆转录酶; 破坏细胞膜	抗菌、抗病毒、抗癌	[12, 20-23]
Dawson 型	$\text{P}_2\text{Mo}_{17}\text{VO}_{62}$	P, Mo, V	抑制血管生成、诱导 ROS	抗癌活性强、酶抑制	[13, 24-26]
Anderson 型	$(\text{NH}_4)_6[\text{Mo}_7\text{O}_{24}]$	Mo	模拟胰岛素信号	抗菌、潜在降糖活性	[12, 27-29]
有机-无机杂化	$[\text{Cu}(\text{phen})_2]_2[\text{PW}_{11}\text{O}_{39}]$	Cu	破坏细胞膜,诱导 细胞凋亡和自噬	靶向抗癌、 高生物相容性	[11, 16, 19, 30, 31]

2.1 抗菌活性

POMs 对多种革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌及耐药菌具有显著的抗菌活性,不同结构类型、不同金属中心的 POMs 抗菌活性存在明显差异,其中 Keggin 型、Dawson 型杂多酸及含 Ag^+ 、 Cu^{2+} 和 V^{5+} 的 POMs 抗菌活性最为突出^[20]。20 世纪 50 年代初,中国科学家俞用川等人针对耐药性金黄色葡萄球菌展开一系列研究,测试了青霉素与多种化合物(如重金属盐、磺胺类等)的联合效果,发现了对耐药性金黄色葡萄球菌的抑制作用,但部分抑菌剂的毒性或稳定性问题仍未解决^[32]。

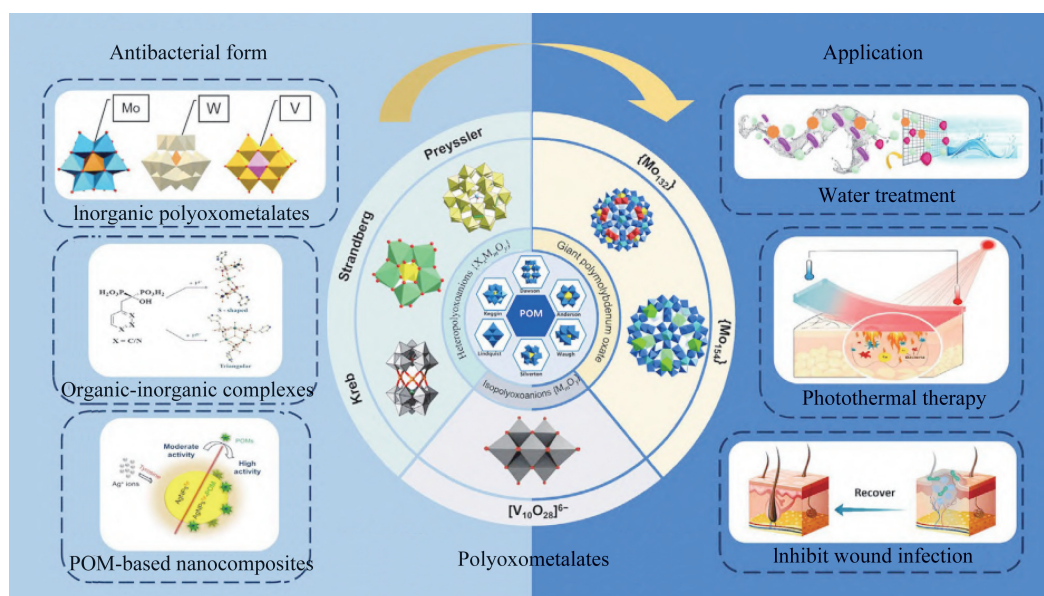


图 3 多金属氧酸盐的抗菌形式及应用图示^[34]

Fig. 3 Schematic diagram of antibacterial forms and application fields of polyoxometalates^[34]

纳米技术的发展为抗菌材料研发提供了新方向,武志富等人合成了对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有明显抑制作用的 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米复合物^[33],为无机抗菌体系的发展提供了新的思路。陆续发现 W 基、Mo 基、V 基 POMs 对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、弧菌、幽门螺杆菌、B 型链球菌等多种细菌具有抑制作用,其中 V 基 POMs 抗菌活性最强,对革兰氏阳性菌最低抑菌浓度 MIC 可达 $2\sim 8\ \mu\text{g}/\text{mL}$,但对哺乳动物细胞毒

性相对较高,半数毒性浓度 TC_{50} 达 $15\sim 30\ \mu\text{g/mL}$; W 基 POMs 抗菌活性适中(MIC 为 $16\sim 64\ \mu\text{g/mL}$), $100\ \mu\text{g/mL}$ 浓度下对正常细胞存活率仍高于 80% ,生物相容性更优^[34]。Mo 基 POMs: $50\ \mu\text{g/mL}$ 浓度下对结肠上皮细胞毒性极低,存活率大于 90% ,是安全的无机抗菌候选材料。整体而言,POMs 及其杂化衍生物凭借广谱抗菌性及高化学稳定性等优势,可通过结构修饰优化性能,成为新型无机抗菌候选材料的重要研究方向,前景广阔(图 3)。

体外细胞实验、细菌形态学分析等研究表明 POMs 的抗菌机制主要包括:破坏细菌细胞膜完整性与膜电位、诱导胞内活性氧(ROS)爆发、干扰细菌关键代谢酶与信号通路(表 1)。磷钼酸盐、 V_{10} -铜(III)三衍生物等可通过诱导 ROS 产生,破坏细菌细胞结构,对耐药菌 MIC 达 $8\sim 16\ \text{mg/mL}$ 的高效抗菌活性^[20]。银掺杂 POMs[(如 $\text{Ag}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$)可持]续释放 Ag^+ ,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌 MIC 低至 $2\sim 4\ \mu\text{g/mL}$,抗菌效果可与庆大霉素媲美^[20,27]。

研发联合应用 POM 基杂化和纳米复合结构(图 4),提供特定潜在靶点,有望解决过度使用抗生素导致的耐药菌问题。金属氧化物纳米颗粒等无机消毒剂的研发,可实现局部破坏细菌而不对周围组织产生毒性。Preyssler 型 POMs 与核糖体靶向抗生素联用可产生协同效应,生物膜清除率由 $20\%\sim 30\%$ 提升至 $60\%\sim 70\%$,展现出高抗菌效率与低耐药风险^[36]。

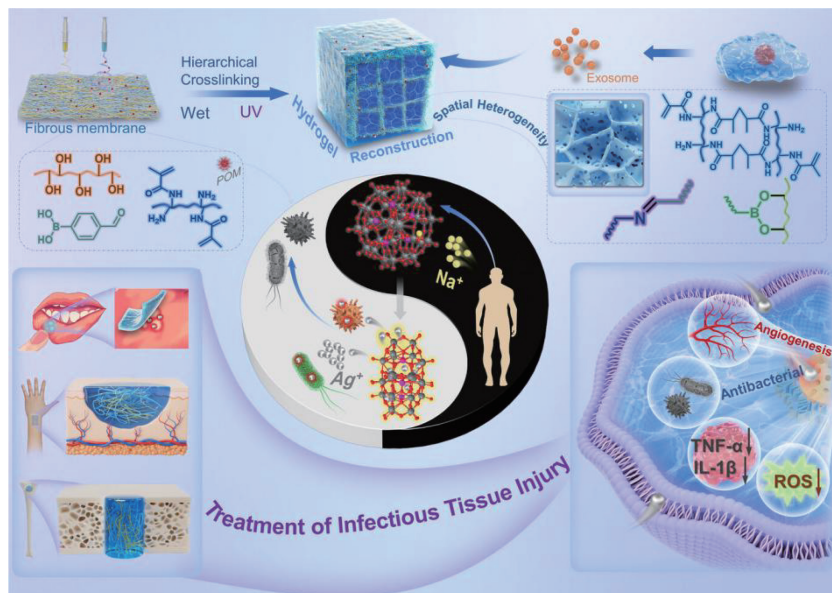


图 4 多金属氧酸盐的一种抗菌形式及应用图示^[35]

Fig. 4 Schematic diagram of antibacterial forms and application fields of polyoxometalates^[35]

更换 POMs 的有机金属组分,可研发更有效的抑菌剂及更安全、无毒、高效的酶抑制剂。例如在磷钼钒杂多金属氧酸盐中,钼原子与钒原子具有协同作用,钒原子取代钼原子会增强该酸的氧化能力,使萘烯醇类底物的氧化转化率可达 $90\%\sim 100\%$,并在催化循环中保持良好的结构稳定性^[37],基于这种良好的氧化活性与结构稳定性,将其与具有抗菌活性的金属中心通过配位键结合,有望开发出具有双活性中心的新型抗菌材料。

2.2 抗病毒活性

POMs 具有广谱抗病毒活性,Keggin 型、缺位 Keggin 型及含 Nb、Ti、V 的杂多酸是抗病毒研究的主流体系,其中 Nb-POMs 因低毒性与高选择性备受瞩目^[38]。1971 年,Raynaud 发现 $[\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}]^{4-}$ 可抑制鼠流感病毒,后续证实能抑制逆转录酶(RT)活性,干扰 HIV-1 的复制,由此开启了 POMs 抗病毒活性的相关研究,后陆续报道 POMs 带高密度负电荷,可与 HIV-1 病毒表面正电荷区域(gp120、gp41)结合,阻断病毒吸附与入侵宿主细胞^[38]。吡啶功能化 POMs 毒性低、抗病毒效率高(抗 HIV-1 抑制率大于 90%),成为研究热点^[39]。以 $\text{A}_7\text{PTi}_2\text{W}_{10}\text{O}_{40}$ 为多酸骨架的吡啶功能化 POM 衍生物对 TZM-bl 细胞的 CC_{50} 大于 $200\ \mu\text{g/mL}$,毒性低于传统 Keggin 型钨酸盐;抗 HIV-1 的 EC_{50} 低至 $0.05\sim 0.1\ \mu\text{mol/L}$,展现兼具高活性与高安全

性^[39]。

POMs 抗病毒机制主要包括:(1) 直接结合病毒颗粒,阻断入侵;(2) 干扰病毒复制、组装、释放等生命周期关键步骤;(3) 部分 POMs 可调节宿主免疫因子表达,增强防御能力^[40]。POMs 通过电荷作用、氢键、配位作用等多种方式与病毒关键蛋白互作(图 5)。目前短板为:钼系、钨系 POMs 在生理 pH 下易水解,释放高价金属离子可能引发肾毒性,需通过靶向递送与元素替换提升稳定性与安全性^[38]。

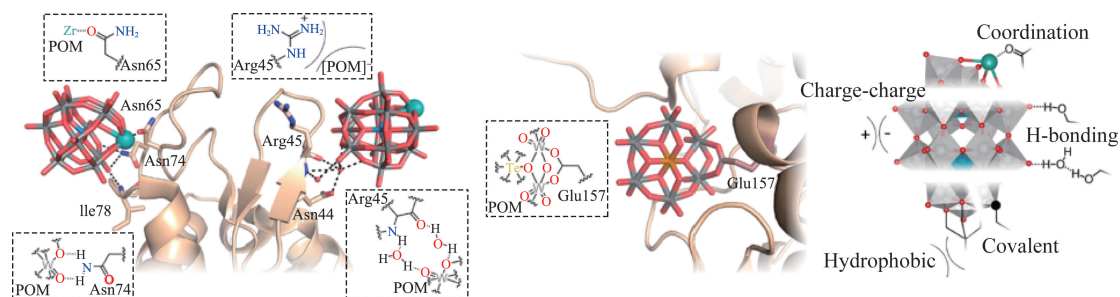


图 5 多金属氧酸盐与蛋白质的相互作用模式示意图^[40]

Fig. 5 Schematic diagram of interaction modes between polyoxometalates and proteins^[40]

2.3 抗癌活性

POMs 具有广谱抗肿瘤活性,Keggin 型、Dawson 型、钒取代杂多酸为核心抗癌研究体系(表 1)。Dawson 型 POMs 在抑制肿瘤血管生成方面优势显著,Keggin 型易修饰,是靶向抗癌的主流骨架。1974 年,Jasmin 等首次报道杂多钨酸盐化合物 $(\text{NH}_4)_{17}\text{Na}[\text{NaSb}_9\text{W}_{21}\text{O}_{86}]$ 具有抑瘤活性,后续脂质体包裹的 $\text{K}_6[\text{SiW}_{11}\text{TiO}_{40}]$,通过纳米化提升生物相容性与抗肿瘤效果^[1,24]。2012 年,Oldfield 课题组合成了一系列多金属氧酸盐-双膦酸盐杂化化合物(图 6),对人乳腺癌细胞 MCF-7、人非小细胞肺癌细胞 NCI-H460 及中枢神经系统肿瘤细胞 SF-268 的 IC_{50} 值分别为 $1.8 \mu\text{mol/L}$ 、 $4.2 \mu\text{mol/L}$ 、 $6.5 \mu\text{mol/L}$,活性较未修饰 POMs 提升 2~3 倍,并实现骨靶向的协同提升^[24,31,41]。

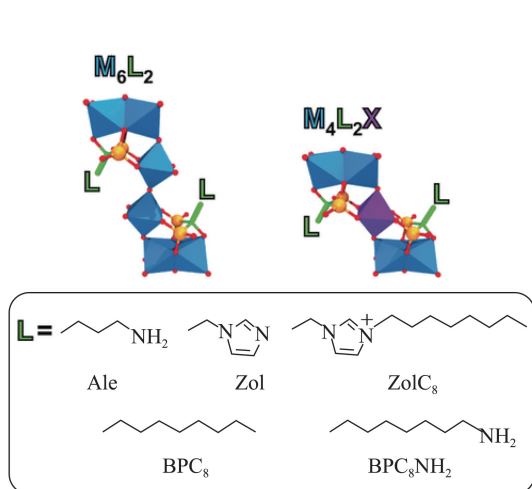


图 6 多金属氧酸盐-双膦酸盐杂化化合物的结构示意图^[24]

Fig. 6 Schematic representation of polyoxometalate-bisphosphonate hybrid structures^[24]

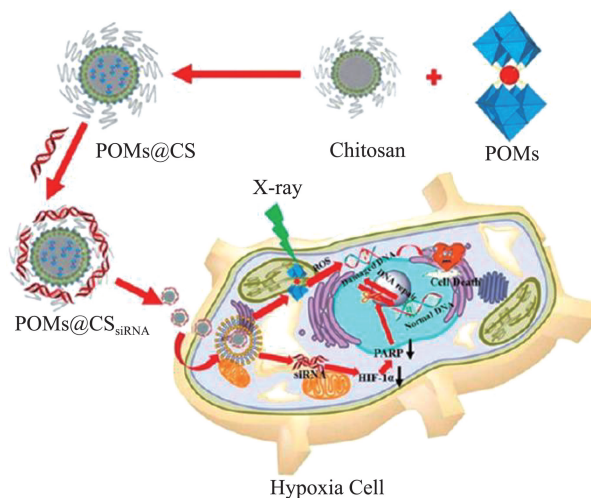


图 7 多金属氧酸盐在抗肿瘤方面应用的示意图^[44]

Fig. 7 Schematic diagram of the application of polyoxometalates in anti-tumor therapy^[44]

POMs 的抗癌机制涉及多靶点调控,包括诱导 ROS 过量生成、激活线粒体凋亡通路、抑制肿瘤血管生成、阻滞细胞周期^[24]。铜取代 $\text{K}_7\text{Na}_3[\text{Cu}_4(\text{H}_2\text{O})_2(\text{PW}_9\text{O}_{34})_2]$ 对人骨肉瘤 MG-63 细胞具有明显的增殖抑制作用,且对正常细胞毒副作用更低,展现良好的抗肿瘤应用潜力^[42]。2015 年,付磊教授等人通过共价接枝长链有机烷氧硅烷,构建了两亲性 Keggin 型 POMs 杂化物^[30]。与未修饰的母体 POMs 相比,这种两亲化修饰显著提升了细胞膜渗透性与生物相容性,其抗癌活性增强主要源于有机配体介导的细胞摄取效率提升,直观体现了有机配体修饰对 POMs 抗癌活性的正向调控作用。2020 年,Zhao 等人对 POMs 抗癌领域的

研究进展进行了系统梳理,为后续 POMs 基抗肿瘤药物的设计与开发提供了重要参考^[25]。在此基础上,生物技术的应用进一步促进了 POMs 抗肿瘤研究的发展,POMs 与 Bcl-2 通路抑制剂联用可大幅提升白血病细胞凋亡水平,凋亡诱导效果提升 2 倍以上;Western Blot 与 qPCR 检测结果表明,促凋亡蛋白 p53、Bax 显著上调,抗凋亡蛋白 Bcl-2 明显下调^[43]。构效关系研究证实,POMs 的抗肿瘤活性可通过有机配体修饰、纳米载体包裹显著增强。将具有生物活性的有机配体与 POMs 连接,可强化其抗肿瘤活性,且经纳米粒子修饰的 POMs 抗肿瘤活性更高构效关系研究表明^[44]。

当前研究仍以体外细胞实验为主,体内药代动力学、组织分布、肿瘤靶向性及长期毒性数据仍较缺乏。未来可通过有机配体嫁接、纳米载体包载、靶向分子修饰进一步提升疗效与安全性,POMs 在抗肿瘤方面还有如下应用(图 7)

2.4 其他生物活性

POMs 在抗炎、抗糖尿病、抗衰老、神经保护等领域同样具有潜力(图 8)。抗炎:Anderson 型钼基 POMs 可抑制 NLRP3 炎症小体活化、清除 ROS,阻断炎症信号通路^[12,46]。抗糖尿病:Keggin 型 W/Mo 基 POMs 可增强胰岛素信号、改善胰岛素抵抗、抑制糖代谢关键酶活性^[29]。神经保护与抗衰老:钒取代 Dawson 型 POMs 通过抗氧化、抗炎、调节代谢,在阿尔茨海默病模型中展现保护作用^[47]。酶抑制:Keggin/Dawson 型多酸骨架与磷酸根结构相似,可高效结合酶活性中心,实现精准酶调控^[25]。

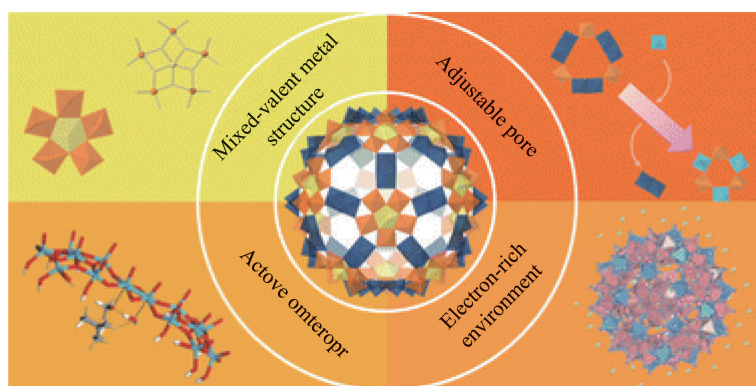


图 8 多金属氧酸盐在其他多种领域的应用示意图^[45]

Fig. 8 Schematic diagram of the application of polyoxometalates in various other fields^[45]

3 挑战与展望

3.1 核心挑战

生物安全性与相容性不足:钒系、钼系 POMs 易水解释放金属离子,引发肾毒性与细胞损伤;体内代谢、排泄途径及长期毒性数据缺失^[38]。靶向性与稳定性欠佳:体内易被清除,病灶富集效率低;农业应用中受土壤 pH、有机质影响易降解,持效期短^[17,21]。合成与成本瓶颈:结构精准调控难度大;传统合成依赖有机溶剂与高温高压,绿色程度低;规模化制备成本高,难以满足农业与医药产业化需求^[1,19]。

3.2 未来展望

功能精准化设计:结合分子模拟与基因编辑,筛选低毒金属组分(Ag、Cu 基),通过氨基酸、多糖表面修饰构建刺激响应型靶向制剂^[24]。联合疗法与场景拓展:医药领域发展 POMs-光热/化学动力学/免疫联合疗法;农业领域开发缓释型抗菌剂、生长调节剂与土壤改良剂^[9,27]。绿色合成与规模化:发展室温溶剂热、超声辅助、生物模板等绿色合成方法;利用工业副产物回收 Mo、W 降低成本;借助 AI 优化合成参数,实现模块化精准制备^[1]。安全评价体系:建立 POMs 体内代谢、环境归趋、长期毒理的系统评价模型,为临床转化与合规应用提供数据支撑^[38]。POMs 凭借结构可调性、优异氧化还原活性及广谱生物效应,在生物医药(抗菌、抗病毒、抗癌)、农业(作物病害防治、生长调控)领域展现出巨大应用潜力。未来,随着无机化学、材料科学、生物学与医学的深度交叉融合,多金属氧酸盐将在精准抗菌、抗病毒、靶向抗肿瘤、绿色农业等领域实现关键突破,有望成为连接无机功能材料与生命健康的重要桥梁。

参 考 文 献

- [1] Guo L, He L, Zhuang Q, et al. Recent advances in confining polyoxometalates and the applications[J]. *Small*, 2023, 19(24): e2207315.
- [2] Cui L P, Zhang S, Zhao Y, et al. Tunable multi-electron redox polyoxometalates for decoupled water splitting driven by sunlight[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 3674.
- [3] Li Z, Liu X, Zhao M, et al. Recent advances in polyoxometalate-based catalysts for light-driven valorization of biomass derivatives[J]. *Dalton Transactions*, 2025, 54(37): 13851-13858.
- [4] 胡长文,黄如丹. 多金属氧酸盐化学研究进展与展望[J]. *无机化学学报*, 2003, 19(4):8.
- [5] Li X, Han Y, Wang C, et al. Atomic-Level Heterometallic Engineering in Single-Crystalline Polyoxometalate-Based MOF for Efficient Solar Photo-Thermo-Electric Conversion[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(7): 7460-7471.
- [6] Liao M, Wang T, Zuo T, et al. Design and Solvothermal Synthesis of Polyoxometalate-Based Cu(II)-Pyrazolate Photocatalytic Compounds for Solar-Light-Driven Hydrogen Evolution[J]. *Inorganic Chemistry*, 2021, 60(17): 13136-13149.
- [7] 杨乐,李科,陈嘉嘉. 多金属氧酸盐团簇材料在能源电化学中的应用[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(1):1-9.
- [8] Jeon D, Kim D Y, Kim H, et al. Electrochemical Evolution of Ru-Based Polyoxometalates into Si, W-Codoped RuOx for Acidic Overall Water Splitting[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(1): e2304468.
- [9] Du M Y, Xiao H P, Xu R F, et al. A Sonosensitive Heterometallic Polyoxometalate for Highly Efficient Chemo-Sonodynamic Synergistic Cancer Therapy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(51): e202514859.
- [10] Tang J, Zhang Z, Kong X, et al. Preparation of magnetic polyoxometalate core-shell composite materials and its applications as drug carriers and catalysts[J]. *Materials Letters*, 2026, 406: 139939.
- [11] Zhu Y, Huang Y, Li Q, et al. Polyoxometalate-based photoactive hybrid: uncover the first crystal structure of covalently linked hexavanadate-porphyrin molecule[J]. *Inorganic Chemistry*, 2020, 59(4): 2575-2583.
- [12] Moghadasi M, Abbasi M, Mousavi M, et al. Polyoxometalate-based materials in therapeutic and biomedical applications: current status and perspective[J]. *Dalton Transactions*, 2025, 54(16): 6333-6345.
- [13] Wang X, Wei S, Zhao C, et al. Promising application of polyoxometalates in the treatment of cancer, infectious diseases and Alzheimer's disease[J]. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2022, 27(4/5): 405-419.
- [14] Yang G, Liu Y, Wei Y. Application of polyoxometalates in biomass conversion[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 521: 216172.
- [15] Wang L Z, Ma X, Zheng T S, et al. Functional Fe-substituted polyoxometalates: from simple clusters to multiple high-nuclear aggregates[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2026, 553: 217571.
- [16] Ifitikhar T, Rosnes M H. Covalent organic-inorganic polyoxometalate hybrids in catalysis[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2024, 12: 1447623.
- [17] Cheng Y, Qin K J, Zang D J. Polyoxometalates based nanocomposites for bioapplications[J]. *Rare Metals*, 2023, 42: 3570-3600.
- [18] Shi F, Chen Y, Dong C, et al. Ni/Mn-complex-tethered tetranuclear polyoxovanadates: crystal structure and inhibitory activity on human hepatocellular carcinoma (HepG-2)[J]. *Molecules*, 2023, 28(19): 6843.
- [19] Anyushin A V, Kondinski A, Parac-VOGT T N. Hybrid polyoxometalates as post-functionalization platforms: from fundamentals to emerging applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(2): 382-432.
- [20] Bijelic A, Aureliano M, Rompel A. The antibacterial activity of polyoxometalates: structures, antibiotic effects and future perspectives[J]. *Chemical Communications*, 2018, 54(10): 1153-1169.
- [21] Chang D, Li Y, Chen Y, et al. Polyoxometalate-based nanocomposites for antitumor and antibacterial applications[J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(18): 3689-3706.
- [22] Qi Y, Han L, Qi Y, et al. Anti-flavivirus activity of polyoxometalate[J]. *Antiviral Research*, 2020, 179: 104813.
- [23] Tian N, Chu D, Wang H, et al. Synthesis and anti-HIV-1 activity evaluation of Keggin-type polyoxometalates with amino acid as organic cations[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2023, 91: 129380.
- [24] Bijelc A, Aureliano M, Rompel A. Polyoxometalates as potential next-generation metallodrugs in the combat against cancer[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(10): 2980-2999.
- [25] Zhao M, Chen X, Chi G, et al. Research progress on the inhibition of enzymes by polyoxometalates[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2020, 7: 4320-4332.
- [26] Song N, Lu M, Liu J, et al. A giant heterometallic polyoxometalate nanocluster for enhanced brain-targeted glioma therapy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(10): e202319700.
- [27] Ma M, Chen J, Dong L, et al. Polyoxometalates and their composites for antimicrobial applications: advances, mechanisms and future

- prospects[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2025, 262: 112739.
- [28] Wang Y, Liu X, Xu W, et al. Triol-ligand modification and structural transformation of Anderson-Evans oxomolybdates via modulating oxidation state of Co-heteroatom[J]. *Inorganic Chemistry*, 2017, 56(12): 7019-7028.
- [29] Chi G, Wang L, Chen B, et al. Polyoxometalates: study of inhibitory kinetics and mechanism against α -glucosidase[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2019, 199: 110784.
- [30] Fu L, Gao H, Yan M, et al. Polyoxometalate-based organic-inorganic hybrids as antitumor drugs[J]. *Small*, 2015, 11(24): 2938-2945.
- [31] Ahmadi M, Sadeghi F, Soltanabadi A, et al. Multifunctional estrone-polyoxometalate-F16 hybrid conjugate: a synergistic targeting approach against breast cancer cells[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2025, 8(10): 8940-8958.
- [32] Silva J C, Costa H R A, Sousa K F, et al. Bibliometric review and perspectives on the biological activity of polyoxometalates against resistant bacterial strains[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2025, 235: 107157.
- [33] Horn M R, Singh A, Alomari S, et al. Polyoxometalates (POMs): from electroactive clusters to energy materials[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14: 1652-1700.
- [34] Zhao B W, Lu C X, Li M L, et al. Recent progress in antimicrobial activity, mechanism, and application of polyoxometalate and its hybrid composites[J]. *Rare Metals*, 2025, 44(11): 8292-8328.
- [35] Li Z T, Yang T, Li W C, et al. A bio-responsive hydrogel with spatially heterogeneous structure for treating infectious tissue injuries[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(23): 2500088.
- [36] Faleiro L, Marques A, Martins J, et al. The Preyssler-type polyoxotungstate exhibits anti-quorum sensing, antibiofilm, and antiviral activities[J]. *Biology (Basel)*, 2022, 11(7): 994.
- [37] Vilanculo C B, Da Silva M J, Rodrigues A A, et al. Vanadium-doped sodium phosphomolybdate salts as catalysts in the terpene alcohols oxidation with hydrogen peroxide[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(39): 24072-24085.
- [38] Čolović M B, Lacković M, Lalatović J, et al. Polyoxometalates in biomedicine: update and overview[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2020, 27(3): 362-379.
- [39] Wang S, Sun W, Hu Q, et al. Synthesis and evaluation of pyridinium polyoxometalates as anti-HIV-1 agents[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2017, 27(11): 2357-2359.
- [40] Salazar Marcano D E, Savić N D, Abdelhameed S A M, et al. Exploring the reactivity of polyoxometalates toward proteins: from interactions to mechanistic insights[J]. *JACS Au*, 2023, 3(4): 978-990.
- [41] El Moll H, Zhu W, Oldfield E, et al. Polyoxometalates functionalized by bisphosphonate ligands: synthesis, structural, magnetic, and spectroscopic characterizations and activity on tumor cell lines[J]. *Inorganic Chemistry*, 2012, 51(14): 7921-7931.
- [42] Leon I E, Porro V, Astrada S, et al. Polyoxometalates as antitumor agents: bioactivity of a new polyoxometalate with copper on a human osteosarcoma model[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2014, 222: 87-96.
- [43] Carvalho F, Aureliano M. Polyoxometalates impact as anticancer agents[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(5): 5043.
- [44] Cao Z Z, Yang W, Cao X H, et al. Recent advances in synthesis and anti-tumor effect of organism-modified polyoxometalates inorganic organic hybrids[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2021, 134: 108904.
- [45] Wang K, Iwano T, Uchida S. Keplerate polyoxometalate compounds: a multifunctional nano-platform for advanced materials[J]. *Dalton Transactions*, 2024, 53: 16797-16806.
- [46] Yang F, Chen Y, Xiao Y, et al. pH-sensitive molybdenum (Mo)-based polyoxometalate nanoclusters have therapeutic efficacy in inflammatory bowel disease by counteracting ferroptosis[J]. *Pharmacological Research*, 2023, 188: 106645.
- [47] Aureliano M, Mateus J, Rijo M D. Polyoxometalates' progress for the treatment of Alzheimer's disease[J]. *BioChem*, 2025, 5(4): 41-41.

(责任编辑:刘庆松)