

二羟基萘 (DHN) 黑色素的合成与应用研究进展

余全强¹, 周晓芳², 庄良¹, 张子嘉¹, 张婉萍¹, 郑时莲^{1*}
(1. 上海应用技术大学香料香精化妆品学部, 上海 201418;
2. 上海积家汇医疗科技有限公司, 上海 200333)

摘要:以 1,8-二羟基萘为单体的异黑色素为核心,系统综述了异黑色素的合成机制,包括异黑色素的真菌合成途径和人工化学合成方法,并总结了合成机理。同时归纳了异黑色素的应用,包括光反应特性衍生出的光保护涂层材料、复合型防晒材料、新能源光电材料、光热转换与免疫协同治疗应用,以及抗氧化特性衍生出的抗炎与抗氧化治疗、新型抗氧化材料和抑菌材料应用。

关键词:异黑色素;二羟基萘黑色素;合成路径;光保护;抗氧化

中图分类号:Q599

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)07-0078-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.015

**A review of dihydroxynaphthalene (DHN) allomelanin:
Synthesis mechanisms and advances in applied research**
YU Quan-qiang¹, ZHOU Xiao-fang², ZHUANG Liang¹, ZHANG Zi-jia¹,
ZHANG Wan-ping¹, ZHENG Shi-lian^{1*}

(1.School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2.Shanghai Jijiahui Medical Technology Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract:This paper systematically reviews the synthesis mechanisms of allomelanin using 1,8-dihydroxynaphthalene as the monomer,including both the fungal biosynthesis pathway and artificial chemical synthesis methods,along with an analysis of the underlying synthesis principle.The applications of allomelanin are summarized,including those based on its photoresponsive properties-such as photoprotective coatings,composite sunscreen materials,advanced optoelectronic materials for renewable energy, and applications in photothermal-immunotherapy-as well as those derived from its antioxidant capabilities, including anti-inflammatory and antioxidant therapies, novel antioxidant materials, and antimicrobial applications.

Key words:allomelanin; dihydroxynaphthalene allomelanin; synthetic pathways; photoprotection; antioxidation

异黑色素是黑色素种类中一种不含氮的天然色素,独特的非氮依赖型化学结构不仅使其具有更高的生物相容性还降低了产生有毒代谢物的风险,碳碳键与醚键聚合使其比碳氮键和具有更高的稳定性^[1-3]。异黑色素的研究已延伸至材料科学、生物医学及环境工程等交叉领域。作为黑色素中一种,异黑色素主要存在于真菌、植物及细菌中^[4],分为二羟基萘(DHN)黑色素、HPQ 黑色素、儿茶酚黑色素,分别由 1,8-二羟基萘、六羟基萘醌、儿茶酚 3 种单体聚合而成。

以 1,8-二羟基萘为结构单元的 DHN 黑色素具有极高的抗辐射性能,真菌能通过 DHN 黑色素在辐射环境中利用高能离子辐射来维持新陈代谢,起到抗辐射和能量转换的作用。此外 DHN 黑色素还兼

具优异的抗氧化性与生物相容性,有望应用于医学的多个领域。DHN 黑色素的合成路径在真菌等生物体系中较为明确,其前体为 1,8-二羟基萘,合成过程中涉及的酶促反应和代谢调控机制已得到较为深入的研究。这一明确的合成路径为 DHN 黑色素的生物工程制备和工业化生产提供了理论基础。本文中聚焦 DHN 黑色素,通过解构其生物化学合成机制、功能特性内在关联及应用瓶颈,系统梳理近年来研究进展与理论突破,旨在为异黑色素的功能开发与产业化应用提供前瞻性理论依据。

1 异黑色素的合成

1.1 生物合成

异黑色素中的 DHN 黑色素是一种由真菌合成

收稿日期:2025-09-29;修回日期:2026-05-03

作者简介:余全强(2000-),男,硕士生;郑时莲(1990-),女,博士,讲师,研究方向为植物活性成分的功效研究与在化妆品中的应用,通讯联系人, zhengsl@sit.edu.cn。

的黑色素,DHN 黑色素主要存在于子囊菌门的植物病原真菌中,如玉米大斑病菌、稻瘟病菌、炭疽菌等。其生物合成过程涉及多步酶催化反应,DHN 黑色素合成于囊泡中,并转移至细胞壁中氧化聚合,聚合后的 DHN 黑色素会包裹住细胞壁的葡聚糖、几丁质和糖蛋白形成类似“钢筋混凝土”的复合结构,此结构的 DHN 黑色素可为真菌提供机械保护和生化抗性^[5]。如图 1 所示,合成起始于乙酰辅酶 A 和丙二酰辅酶 A 的聚合,乙酰-CoA 与丙二酰-CoA 经聚酮

合酶作用生成萘并吡喃酮。萘并吡喃酮依次经还原酶和脱水酶作用,逐步转化为 1,3,6,8-四羟基萘,这是异黑色素的前体化合物^[5]。1,3,6,8-四羟基萘被 1,3,6,8-四羟基萘还原酶(4HNR)还原为小柱孢酮^[6],小柱孢酮脱水酶(SCD)催化小柱孢酮脱去 1 分子水,生成 1,3,8-三羟基萘,后被 1,3,8-三羟基萘还原酶(3HNR)还原为柱孢酮^[7],SCD 再次催化柱孢酮脱水生成 1,8-二羟基萘,随后漆酶(LAC)氧化 1,8-DHN 形成高分子黑色素聚合物^[8]。

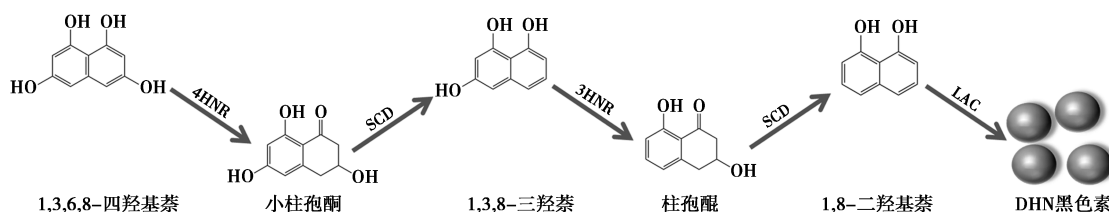
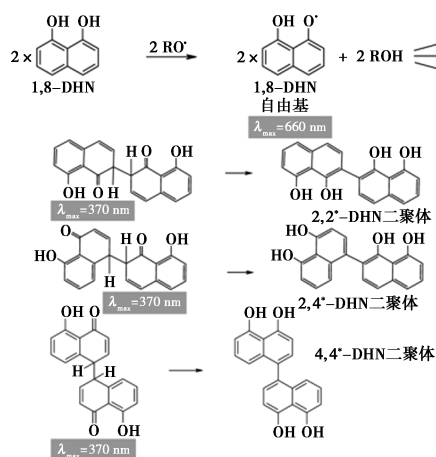


图 1 异黑色素生物合成路径示意图

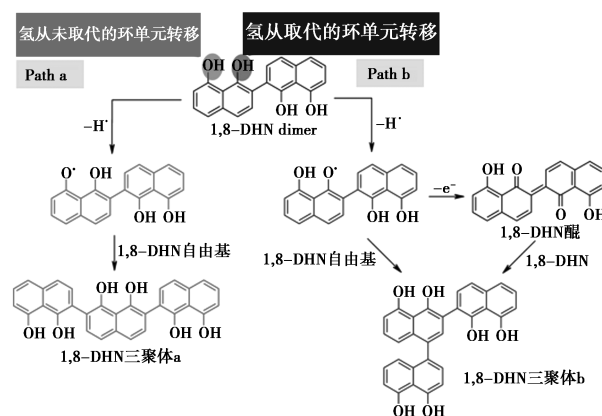
1.2 化学合成

1.2.1 酶促氧化法

酶促氧化法制备异黑色素最常用的 2 种酶是辣根过氧化物酶和漆酶,Manini 等^[9]以辣根过氧化物酶为催化物制备 DHN 黑色素,分析表明单体 1,8-二羟基萘 1 号位羟基经氢原子转移生成自由基中间体,随后萘环上的 2-位和 4-位间发生随机偶联生产异构体混合物,得到 3 种异黑色素二聚体如图 2(a)。二聚体间随后又发生氢原子转移生成二聚体自由基中间体,进一步通过 2-和 4-位偶联聚合形成多环芳香结构如图 2(b)。Lino 等^[10]以辣根过氧化物酶催化制备了具有高孔结构的 DHN 黑色素可高效去除水体中的阳离子染料亚甲基蓝,同时通过氨诱导固态聚合沉积制备的尼龙过滤装置具备吸附与过滤功能。



(a) 异黑色素二聚体聚合位点



(b) 异黑色素多聚体聚合位点

图 2 异黑色素二聚体与多聚体形成

1.2.2 化学氧化法

DHN 黑色素的生成可以通过强氧化剂氧化法制备,Mccallum 等^[11]用高碘酸钠和高锰酸钾为氧化剂制备异黑色素,通过控制甲醇溶解时间,可实现从致密球体→空心结构→多孔网状结构的连续调控,这种可调控的结构使异黑色素适配多种场景的使用。例如经过溶解后的高孔隙度材料有望在未来开发为高吸附材料应用于毒素吸附和污水处理等多种场所。

除了使用强氧化剂氧化,一种更绿色环保的办法是用空气中的氧气作为氧化剂,Pukalski 等^[12]以 1,8-二羟基萘为前体,在碱性条件下通过空气氧化合成获得黑色层状聚合物,文章首次通过核磁共振明确证实 DHN 黑色素中醚键的存在,提出三层结构模型如图 3,既表面层为亲水层含有大量羟基与羧

基,中间层通过萘环堆积与聚芳核 C—C 键连接维持,各层间通过醚键连接。该研究提供了一种高效、低成本的 DHN 黑色素合成方法,揭示了其多层结构与醚键特征,为真菌学、材料科学及医学应用提供了新模型。

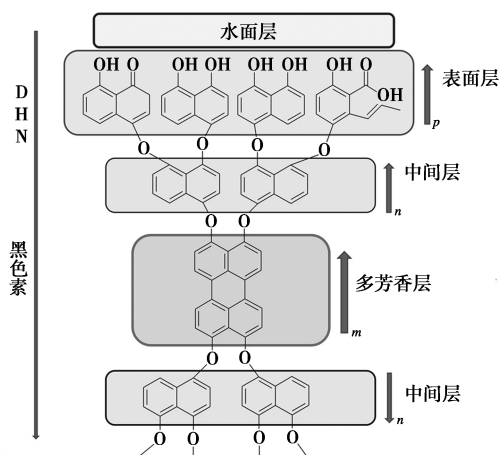


图 3 异黑色素层状结构

分子动力学模拟研究表明,DHN 黑色素纳米颗粒的形成依赖于二聚体的氢键和 π - π 堆叠相互作用,不同结构的二聚体具有不同的纳米颗粒形态和表面特性,例如,2,2'二聚体形成球形且表面疏水,而 4,4'二聚体形成各向异性结构表面具有两亲性。此外还可以复配其他材料调节表面性质,例如聚乙二醇的添加可以调节纳米颗粒的表面相互作用,但不会显著改变其内部结构^[13]。DHN 黑色素可通过调节氧化方法、溶解条件及复配材料实现多功能化设计,为在材料科学、环境工程和医学领域的应用奠定了结构基础。

DHN 黑色素的化学合成法归结为通过提供电子使 1,8-二羟基萘转化为自由基中间体,再与其他中间体随机偶联生成二聚体,二聚体的不断偶联生成 DHN 黑色素。对比 2 种氧化法,化学氧化法无需酶的使用更适合工业生产,且化学氧化法已实现以氧气作氧化剂制备 DHN 黑色素的方案,降低生产成本。不管化学氧化法或酶促氧化法,因为 C—C 偶联的随机性使其终产物有一定的不确定性,无法保证终产物的偶联均为 2-2、4-4 或 2-4 偶联间的一种,导致分子质量分布、交联度及空间构型难以精准控制,从现有研究分析这种随机偶联方式对 DHN 黑色素的物理化学特性无影响,但缺少在生物反应性上的对比。

2 异黑色素的应用

2.1 光保护涂层材料

紫外线(UV)的电磁波谱介于可见光与 X 射线之间,属于不可见光,波长范围 100~400 nm,分为 UVC(100~280 nm)、UVB(280~315 nm)、UVA(315~400 nm)。长期暴露于紫外线下会导致皮肤衰老、材料老化、食物变质等,严重的甚至会引发皮肤癌。DHN 黑色素因出色的紫外吸收和抗氧化性能,逐渐成为光保护材料研究的重要方向,异黑色素广泛的共轭体系和丰富的氢键相互作用使其在紫外线吸收和自由基清除方面表现出显著的性能。异黑色素对 UVA、UVB、UVC 都具吸收能力,尤其是对高能 UVC^[14],UVC 会损坏精密材料尤其是航天器和卫星,高效的 UVC 防护材料可以提升航天仪器的使用寿命。

DHN 黑色素对高能 UVC 吸收来源于其高度的共轭结构,高度的共轭结构增强了其紫外吸收能力,Wang 等^[15]通过密度泛函理论计算和实验证明,DHN 黑色素的紫外线吸收能力主要归因于其高度的共轭结构和电子离域效应,其分子结构中芳香环的共轭体系能够通过 π - π^* 电子跃迁有效捕获紫外光子,接着紫外线能量转化为热能,减少了紫外线对材料的直接破坏。自然界中真菌合成的 DHN 黑色素通过这一机制能够将辐射能转化为化学能以支持生长^[16]。

关于能量转换途径,Petropoulos 等^[17]发现光激发后,能量通过激子耦合态转移至低能态见图 4(a),随后氢醌与醌结构间发生电子-质子协同转移如图 4(b),形成感光产物及半醌型自由基阴离子,光照停止后,自由基浓度呈指数衰减由此实现光消解与自由基清除的协同光保护功能,可见 DHN 黑色素的光保护是光吸收与自由基清除协同作用的结果。

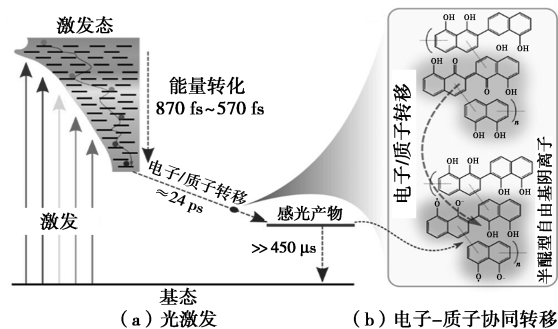
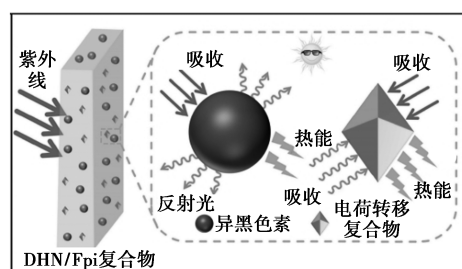


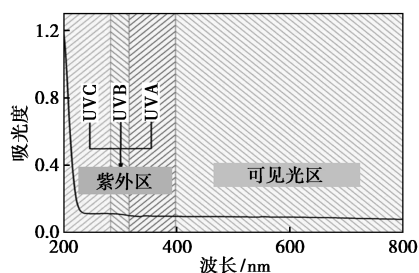
图 4 异黑色素光激发动力学图解

2.2 复合型防晒材料

传统的无机紫外吸收添加剂如 TiO_2 和 ZnO 在复配如聚多巴胺等聚合物时会因光催化效应使多巴胺发生降解,与之相比 DHN 异黑色素纳米粒子可很好地避免因光催化导致的聚合物降解问题^[18], Li 等^[19]研究发现,当 DHN 黑色素与氟化聚酰亚胺(FPI)复合时,二者通过氢键形成稳定的网络结构,氢键网络不仅增强了力学性能,还延长了紫外线的传播路径,通过多重反射和散射进一步提升屏蔽效率如图 5(a)。FPI 分子链中的电荷转移复合物可吸收 UVA 和 UVB 波段紫外线,而 DHN 黑色素则补充了对高能 UVC 的吸收如图 5(b),实现了紫外波段的协同覆盖。复合膜的紫外屏蔽效率最高可达到纯 FPI 的 1.78 倍。DHN 黑色素复合薄膜在紫外线照射下能够保持较高的机械性能和光稳定性,显著减少紫外线对材料的损伤,未来可进一步探索 DHN 黑色素与其他功能材料的复合设计,以拓展其在不同环境中的应用。



(a) 异黑色素复合 FPI 光保护机制



(b) 异黑色素紫外-可见光吸收光谱

图 5 异黑色素光保护机制

2.3 新能源光电材料

随着化石能源的过渡开采,新型清洁能源的开发一直是国际社会研究的重点,太阳能是来自太阳的辐射能量,是真正取之不尽、用之不竭的可再生能源。中国的光伏发电设备主要集中于西北沙漠地区,西北地区昼夜温差大,湿度低,对光伏材料的极端环境下的稳定性要求高, Pira 等^[20]研究了 DHN 黑色素在多孔硅(PSi)复合材料中的应用,系统评估了其光电性能和稳定性。对比研究发现 DHN 黑

色素制备的 PSi-DHN 复合材料能显著提升光电流生成能力,可产生高达数百微安的光电流。此外, DHN 黑色素在干湿循环中表现出更强的化学稳定性,这种稳定性使其成为长期运行太阳能电池器件的理想选择。

2.4 光热转换与免疫协同治疗应用

肿瘤的产生源于基因的失控,部分肿瘤的治疗是现代医学的一大难点,胶质母细胞瘤是中枢神经系统最常见的原发性恶性肿瘤,目前治疗方案有手术切除、放射治疗、化疗、靶向/免疫治疗^[21]。DHN 黑色素作为天然光热转换剂被应用于原位胶质母细胞瘤的靶向光热免疫联合治疗,以 DHN 黑色素作为载体,在 808 nm 激光照射下可实现高效光热转化,诱导肿瘤局部高温,直接杀伤肿瘤细胞,同时诱导免疫原性细胞死亡,暴露肿瘤相关抗原使免疫细胞能够将其识别并进行清除^[22]。

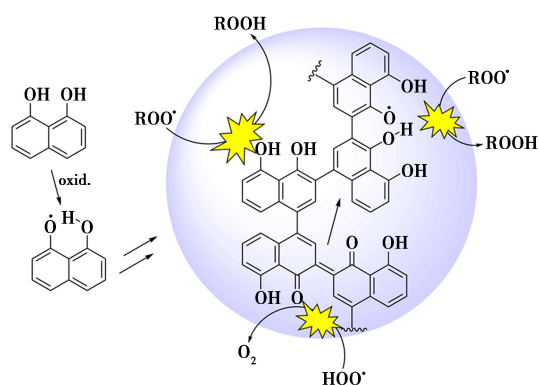
2.5 新型抗氧化材料

DHN 黑色素广泛存在于真菌、动物和植物中,具有显著的抗氧化能力,能够清除活性氧(ROS)和其他自由基。DHN 黑色素能够通过醌和酚单元捕获自由基,从而抑制氧化链的传播^[23]。结构上 DHN 黑色素的芳香环和醌结构提供了连续的 π 电子共轭网络,这种共轭体系允许自由基离域化从而稳定未配对电子。

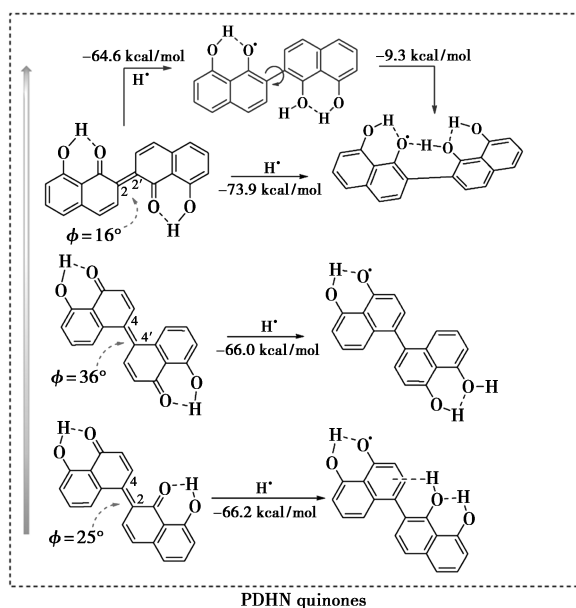
与传统多巴胺聚合物的抗氧化能力相比,DHN 黑色素展现出更优异的抗氧化性能,将 DHN 黑色素引入水凝胶中,形成了一种新型的复合水凝胶,这种复合水凝胶在体外和体内均表现出优异的自由基清除活性,相较于多巴胺,DHN 黑色素能够更有效清除多种自由基^[24]。Mavridi-Printezi 等^[25]通过对比聚多巴胺和异黑色素在水中捕获自由基的过程,发现 DHN 黑色素的抗氧化活性显著高于聚多巴胺。究其原因 $\text{HOO}\cdot$ 自由基与 DHN 异黑色素中的醌单元反应生成半醌自由基,这些半醌自由基进一步捕获 $\text{ROO}\cdot$ 或 $\text{HOO}\cdot$ 自由基,从而延长抗氧化活性如图 6(a)。此外 DHN 异黑色素中的醌单元对 $\text{HOO}\cdot$ 自由基具有较高的氢原子亲和力,特别是 2,2'-二聚体如图 6(b),其结构中的醌和酚单元能有效抑制氧化链反应的传播,二聚体间表现出的抗氧化差异也暗示若能调控单体间的偶联位点或能更高效制备出新型高抗氧化材料。

2.6 抗炎与抗氧化治疗应用

DHN 黑色素高效的自由基清除效果使其有望在相关医学领域成为新型抗氧化治疗药物,



(a) 异黑色素捕获自由基示意图



(b) 异黑色素醌单元氢原子传递示意图

图 6 异黑色素抗氧化图解

Liu 等^[26]将 DHN 黑色素开发为一种口服型纳米药品,用于治疗葡聚糖硫酸钠诱导的急性结肠炎,DHN 黑色素能清除肠道炎症微环境中过量的活性氧,同时能抑制促炎因子的释放并促进恢复紧密连接蛋白。DHN 黑色素具有耐酸、耐酶降解的特性不会在胃中被分解,适合口服给药。除了口服给药,DHN 黑色素还能实现注射给药。Mo 等^[27]将 DHN 黑色素开发为一种静脉注射型纳米药物,用于治疗心肌缺血再灌注损伤,其核心为清除心肌组织中过量的活性氧、减少心肌细胞凋亡、血管再生以及微环境调控。DHN 黑色素能促进炎症 M1 亚型巨噬细胞转化为抗炎 M2 亚型巨噬细胞,并抑制中性粒细胞的浸润,减少 ROS 的释放加速愈合反应和血管生成促进心脏修复。

DHN 黑色素作为天然产物具有良好的生物相容性,可以替代某些传统药物生物不相容的问题,

Chen 等^[28]将 DHN 黑色素引入治疗感音神经性听力损失,DHN 黑色素可穿透血路屏障靶向递送至耳蜗,但现在仍然不清楚 DHN 黑色素为何能靶向递送耳蜗区域的问题,但可以肯定 DHN 黑色素在清除活性氧和抑制炎症通路的同时保护了毛细胞、带状突触和螺旋神经元起到了治疗效果,替代传统治疗中金属基纳米材料如金、氧化铈的使用,展现了优良的生物相容性。依据不同的使用场景 DHN 黑色素还可以制备成不同的药剂形式。

2.7 抑菌材料

在开放性伤口的治疗中,在预防发炎的同时还需要抑制细菌感染,DHN 黑色素高效抗氧化性赋予了其一定的抗菌性,Ziegler 等^[29]通过电化学沉积方法制备了 DHN 黑色素薄膜,该薄膜对 2 种铜绿假单胞菌菌株表现出显著的抗菌效果,相比其他抗菌材料,如银纳米颗粒,该薄膜无需复杂的制备过程或后处理,具有显著的优势,其抗菌机制可能是通过氧化细菌细胞膜脂质导致细菌死亡。DHN 黑色素有望在医学上成为新型抗炎和抗菌材料,但其在生物体内的降解产物及其潜在风险未知,缺乏活体代谢途径、长期毒性及透皮性评估,限制了其在医用药物或防晒产品中的应用,未来需要进一步投入追踪。

3 总结与展望

异黑色素作为一类不含氮的天然色素,近年来因独特的化学结构和多功能性成为研究热点。其中 DHN 黑色素以 1,8-DHN 非氮芳香单体为前体,通过 C—C 偶联构建刚性共轭骨架,形成独特的电子离域体系。这种结构特征不仅具有紫外吸收能力,且具有优异的光稳定性。来自 DHN 黑色素的醌-酚氧化还原除了能直接淬灭活性氧外还可通过氢原子转移与电子转移的协同机制,实现自由基链式反应的可控终止。对 DHN 黑色素真菌合成机制的解析已经接近透彻,对其化学合成领域打下坚实的基础,然而,DHN 黑色素从实验室走向产业化应用仍需攻克不少科学挑战:其一是化学合成中动力学控制难题导致分子质量分布离散,且复杂工况下的结构稳定性机制尚未明晰。其二,尽管体外实验显示良好生物相容性,但其纳米尺度效应引发的体内代谢途径异化及免疫应答特征亟待系统解析。其三,现有研究多停留于单一功能验证,缺乏跨尺度集成创新,规模化生产仍面临聚合度控制困难、稳定性调控不足及生物相容性评估不充分等挑战。未来研究需聚焦于优化绿色合成工艺,揭示自组装机制,并探

索其在抗衰老、能源存储等新兴领域的应用,同时加强生物安全性评估,推动 DHN 黑色素从实验室走向产业化。

参考文献

- [1] Milescu R A, Dennis M R, McElroy C R, *et al.* The role of surface functionality of sustainable mesoporous materials starbon® on the adsorption of toxic ammonia and sulphur gases [J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2020, 15: 100230.
- [2] Ren X, Chen X, Geng Z, *et al.* Bone-targeted biomaterials: Strategies and applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137133.
- [3] Jogdeo C M, Siddhanta K, Das A, *et al.* Beyond lipids: Exploring advances in polymeric gene delivery in the lipid nanoparticles era [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(31): 2404608.
- [4] Pralea I E, Moldovan R C, Petrache A M, *et al.* From extraction to advanced analytical methods: The challenges of melanin analysis [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(16): 3943.
- [5] Ao J, Bandyopadhyay S, Free S J. Characterization of the neurospora crassa dhN melanin biosynthetic pathway in developing ascospores and peridium cells [J]. *Fungal Biol-Uk*, 2019, 123(1): 1–9.
- [6] Ma S X, Cao K K, Liu N, *et al.* The *stlac 2* gene is required for cell wall integrity, dhN-melanin synthesis and the pathogenicity of *Setosphaeria turcica* [J]. *Fungal Biol-Uk*, 2017, 121(6/7): 589–601.
- [7] Kihara J, Moriwaki A, Tanaka N, *et al.* Characterization of the *bmrl* gene encoding a transcription factor for melanin biosynthesis genes in the phytopathogenic fungus *bipolaris oryzae* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2008, 281(2): 221–227.
- [8] Woloshuk C P, Sisler H D, Tokousbalides M C, *et al.* Melanin biosynthesis in *pyricularia oryzae*: Site of tricyclazole inhibition and pathogenicity of melanin-deficient mutants [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 1980, 14(3): 256–264.
- [9] Manini P, Bietti M, Galeotti M, *et al.* Characterization and fate of hydrogen-bonded free-radical intermediates and their coupling products from the hydrogen atom transfer agent 1,8-naphthalenediol [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(4): 3918–3927.
- [10] Lino V, Castaldo R, Gentile G, *et al.* Reusable melanin-based biosorbents for efficient methylene blue removal: The new frontier of fungi-inspired allomelanin coatings for sustainable water remediation processes [J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 21: 100283.
- [11] McCallum N C, Son F A, Clemons T D, *et al.* Allomelanin: A biopolymer of intrinsic microporosity [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(10): 4005–4016.
- [12] Pukalski J, Mokrzyński K, Chyc M, *et al.* Synthesis and characterization of allomelanin model from 1,8-dihydroxynaphthalene autooxidation [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 567–582.
- [13] Kapoor U, Jayaraman A. Self-assembly of allomelanin dimers and the impact of poly(ethylene glycol) on the assembly: A molecular dynamics simulation study [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2020, 124(13): 2702–2714.
- [14] Catanzaro I, Gorbushina A A, Onofri S, *et al.* 1,8-dihydroxynaphthalene (dhN) melanin provides unequal protection to black fungi *knufia petricola* and *cryomyces antarcticus* from uv-b radiation [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2024, 16(6): e70043.
- [15] Wang C, Zhang R, Zhang J, *et al.* Synthetic fungal melanin uv absorbers [J]. *Science China Chemistry*, 2024, 67(9): 3098–3110.
- [16] Rassabina A E, Gurjanov O P, Beckett R P, *et al.* Melanin from the lichens *cetraria islandica* and *pseudevernia furfuracea*: Structural features and physicochemical properties [J]. *Biochemistry (Moscow)*, 2020, 85(5): 623–628.
- [17] Petropoulos V, Mordini D, Montorsi F, *et al.* Photochemical pathways and light-enhanced radical scavenging activity of 1,8-dihydroxynaphthalene allomelanin [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(11): 10031–10043.
- [18] Li Q, Guo Y, Ouyang C, *et al.* Porous highly fluorinated polyimide/polydopamine nanocomposite films with simultaneously enhanced toughness, uv-shielding and photostability for aerospace applications [J]. *Polymer Testing*, 2023, 118: 107899.
- [19] Li Q, Guo Y, Wu M, *et al.* Fluorinated polyimide/allomelanin nanocomposites for uv-shielding applications [J]. *Molecules*, 2023, 28: 5523.
- [20] Pira A, Amatucci A, Melis C, *et al.* The interplay of chemical structure, physical properties, and structural design as a tool to modulate the properties of melanins within mesopores [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 11436.
- [21] Roda D, Veiga P, Melo J B, *et al.* Principles in the management of glioblastoma [J]. *Genes*, 2024, 15(4): 501.
- [22] Sun M, Li Y, Zhang W, *et al.* Allomelanin-based biomimetic nanotherapeutics for orthotopic glioblastoma targeted photothermal immunotherapy [J]. *Acta Biomaterialia*, 2023, 166: 552–566.
- [23] Butler M J, Day A W, Henson J M, *et al.* Pathogenic properties of fungal melanins [J]. *Mycologia*, 2019, 93(1): 1–8.
- [24] Zhang H, Huang C, Zhang J, *et al.* Synthetic fungal melanin nanoparticles with excellent antioxidative property [J]. *Giant*, 2022, 12: 100120.
- [25] Mavridi-Printezi A, Mollica F, Lucernati R, *et al.* Insight into the antioxidant activity of 1,8-dihydroxynaphthalene allomelanin nanoparticles [J]. *Antioxidants*, 2023, 12(8): 11–24.
- [26] Liu Y, Gao P, Jia X, *et al.* Oral-administered allomelanin-like nanomedicine with multi-enzyme mimesis and favorable gastrointestinal tolerance for amelioration of acute colitis [J]. *Applied Materials Today*, 2024, 37: 102143.
- [27] Mo X, Xiang H, Wei L, *et al.* Nature-inspired allomelanin nanomedicine alleviates cardiac ischemia/reperfusion injury via scavenging free radicals and ameliorating myocardial microenvironment [J]. *Nano Today*, 2022, 46: 101589.
- [28] Chen F, Jiang Q, Xu B, *et al.* Ototoxicity-alleviating and cytoprotective allomelanin nanomedicine for efficient sensorineural hearing loss treatment [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(38): 26401–26418.
- [29] Ziegler K, Boecker M, Ball V, *et al.* Multifunctional thick films obtained by electrodeposition of 1,8-dihydroxynaphthalene, an allomelanin precursor [J]. *Langmuir*, 2025, 41(6): 3971–3985. ■