

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.03.002

NIR-II吸收型小分子光热剂及光热治疗应用研究进展

梁晓晴, 刘志鹏*

南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037

摘要:近红外二区(NIR-II, 1 000~1 700 nm)有机小分子光热剂凭借其可调的光物理特性、结构修饰灵活性、高光热转换效率、良好的生物相容性以及卓越的组织穿透能力,在深部肿瘤治疗等生物医学领域展现出巨大应用潜力。本文综述了最近几年来多种具有代表性的NIR-II吸收型小分子光热剂的研究进展,重点聚焦于花菁类、苯并双噻二唑类及氟硼二吡咯类等分子平台的结构设计策略与性能调控机制。通过比较 π 共轭扩展、电荷转移增强、J-聚集构建等不同设计路径对分子光热性能(包括吸收波长调控、光热转换效率提升、光稳定性增强及水溶性改善)的影响,揭示了分子在激发态能级调控与光热功能之间的内在关系,此外,本文还探讨了小分子光热材料在纳米封装、生物靶向、影像引导治疗等方向的集成化发展趋势,分析了其在临床转化过程中所面临的挑战,并展望了未来在精准肿瘤光热治疗中的应用前景。

关键词:近红外二区;小分子光热材料;光热治疗

中图分类号:R318.08

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)03-0258-12

Recent advances in NIR-II absorbing small-molecule photothermal agents for photothermal therapy

LIANG Xiaoqing, LIU Zhipeng*

College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Near-infrared II (NIR-II, 1 000~1 700 nm) organic small-molecule photothermal agents (PTAs) have demonstrated remarkable potential in deep-tissue tumor therapy of biomedical field with their tunable photophysical properties, structural versatility, high photothermal conversion efficiency, excellent biocompatibility, and superior tissue penetration capability. This review systematically summarizes recent advances in representative NIR-II absorbing small-molecule PTAs, with a focus on the structure-design strategies and performance-regulation mechanisms of the molecular platforms, including cyanines, benzobisthiadiazoles, and boron-dipyrromethenes. Various molecular engineering approaches, including π -conjugation extension, charge-transfer enhancement, and J-aggregate construction, etc. are compared to elucidate their influence on key performance metrics, including absorption wavelength modulation, photothermal conversion efficiency, photostability, and aqueous solubility. These comparisons highlight the intrinsic relationship between excited-state energy-level regulation and photothermal functionality. Furthermore, this paper discusses the integrated development trends in nanoparticle encapsulation, biological targeting, and image-guided therapy. It also analyzes the existing challenges in clinical practice and projects future applications in precision photothermal oncology.

Keywords: Near-infrared II (NIR-II); small-molecule photothermal materials; photothermal therapy

*通信作者

收稿日期:2025-07-11;修回日期:2025-08-16

0 引言

癌症作为全球范围内最严重的公共健康问题之一,其发病率和死亡率持续攀升。根据统计数据,全球每年约六分之一的死亡归因于癌症^[1]。目前,临床治疗主要依赖手术、化疗和放疗等传统手段,但 these 方法常伴有严重的毒副作用,可能对正常组织和器官造成不可逆的损伤。因此,开发具有低毒性、副作用小且具有高度靶向性的替代治疗策略,已成为当前医学研究的迫切需求。

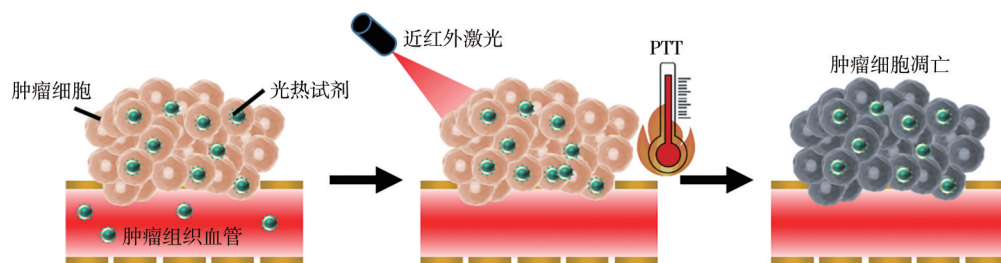


图1 光热治疗示意图

Figure 1 Schematic illustration of photothermal therapy

近些年,多种近红外光热剂的开发极大推动了该技术在癌症治疗中的应用^[2-5]。其中,近红外一区(NIR-I, 700~1 000 nm)光热剂的研究已相对成熟,包括无机纳米材料、共轭聚合物和有机小分子等多种类型。相比之下,有机小分子因其易于结构修饰、合成重复性高、生物相容性好等优点而受到特别关注。然而,NIR-I窗口在组织穿透深度、背景信号干扰和成像分辨率方面存在固有局限,限制了其在深部肿瘤治疗中的进一步应用。这促使研究者将目光投向组织穿透力更强的近红外二区(NIR-II, 1 000~1 700 nm)窗口,以提升治疗的精准性和深度。

尽管贵金属^[6-7]、二维纳米材料^[8-9]、碳基纳米材料^[10-11]和金属硫化物^[12-13]等无机光热剂在光稳定性和光热转换效率方面具有优势,但其生物降解性差、潜在毒性大等问题,严重限制了临床转化的前景。目前人们已聚焦于有机光热材料的开发,主要包括共轭聚合物和有机小分子材料两大类。然而,共轭聚合物虽然具有良好的生物相容性,但也存在代谢困难、分子量不可控的缺陷^[14-15]。相较之下,结构明确、代谢路径可控的有机小分子材料因其优良的生物相容性、结构可调性及潜在的临床转化能力,成为更具前景的选择。以吲哚菁绿(Indocyanine Green, ICG)为例,作为首个被美国食品药品监督管理局(FDA)批准用于临床血管造影的有机小分子染

近年来,光热治疗(photothermal therapy, PTT)作为一种新兴的治疗手段受到了广泛关注。其基本原理是利用光热剂(photothermal agent, PTA)将近红外光能有效转化为热能,在照射部位产生46~50 °C的局部高温,从而实现对肿瘤细胞的选择性杀伤(图1)^[2]。在光热治疗中,光热剂的性质对治疗效果起决定性作用。因此,设计并开发具备高光热转换效率、优异生物相容性和良好靶向能力的光热剂,是该领域研究的核心挑战之一。

料^[16-18],其光热特性也已被用于探索肿瘤治疗的可能性^[19-21]。

目前基于花菁、苯并双噻二唑和氟硼二吡咯等结构的有机小分子光热剂已广泛用于NIR-II成像及光热治疗^[22-24]。通过延长分子共轭体系、修饰末端基团、构建J-聚集体等策略,这些分子不仅将吸收波长成功拓展至NIR-II区域,还凭借更窄的能隙和增强的非辐射跃迁效率,实现了更高的光热转换能力。本文将系统总结近年来基于上述三类骨架的NIR-II光热剂的设计策略与光热治疗研究进展(图2)。重点介绍其分子设计、光热性能和生物相容性并进一步讨论了小分子光热剂在临床转化过程中面临的挑战及未来发展前景。

1 基于NIR-II吸收型有机小分子光热材料

目前,基于花菁(Cyanine)、苯并双噻二唑(BBTD)、氟硼二吡咯(BODIPY)等经典荧光团的小分子光热剂,通过扩展 π 共轭体系、增强分子内电荷转移(ICT)、构建J-聚集体等策略(图3a),实现了吸收波长从NIR-I到NIR-II的高效红移(图3b)。例如,通过扩展共轭链或调控质子化状态,花菁染料的吸收波长可延伸至1 000 nm以上;通过硒(Se)原子取代BBTD中的硫(S)原子,显著提高了共轭平面性,使吸收峰红移至1 120 nm;而在BODIPY骨

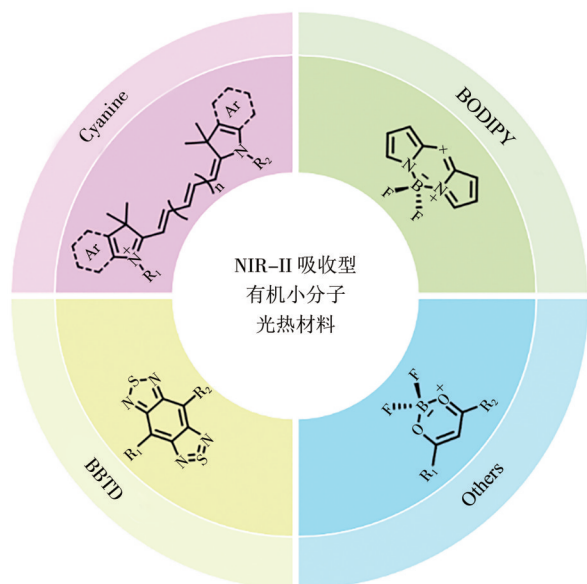


图2 NIR-II小分子光热材料分类

Figure 2 Classification of NIR-II small molecule photothermal materials

架中引入强推电子单元或形成J-聚集体,可将其吸收范围拓展至1 200 nm以上。此外,纳米封装技术不仅解决了疏水性分子的生物相容性问题,还通过抑制荧光发射、增强非辐射跃迁,进一步提高了光热转换效率。

1.1 基于花菁的小分子光热剂

花菁染料(Cyanine dyes)作为经典的有机荧光团,因其独特的共轭骨架和优异的光学性质,在成像和治疗领域中被广泛应用。其基本结构由两个氮杂环通过一个含有奇数碳原子的多烯链连接,其中一端氮原子带正电荷^[30]。目前,大多数花菁类光热剂的吸收集中于近红外一区(NIR-I, 700~900 nm),但该波段的组织穿透深度较浅(通常<5 mm),且易受到组织自发荧光干扰,导致信噪比降低。更重要的是,NIR-I区域的光热转换效率普遍偏低,严重限制了花菁类光热剂在深部肿瘤治疗中的应用潜力。

为克服上述局限,近年来研究者们通过拓展共轭链、调控分子内电荷转移以及构建J-聚集体等策略,成功将花菁染料的吸收波长推移至NIR-II区域。这一系列分子设计策略不仅显著提升了组织穿透深度,也有效降低了组织散射和背景干扰,从而提高了光热治疗的精准性与效率。然而,过度延长共轭结构往往会牺牲分子的光稳定性,易导致光漂白等问题。为此,研究人员进一步引入刚性结构或将染料封装成纳米颗粒,以增强其稳定性和水溶性。

例如,Sletten课题组与张凡团队,已经通过扩

展 π 共轭体系和引入末端吡啶盐基团,成功将花菁的吸收峰调控至1 000 nm以上^[31-32]。基于此设计,王强斌和闫立峰等^[25]以Flav7为核心骨架($\lambda_{\text{abs}}=1\,027\text{ nm}$),通过用硫醚羧酸基团取代 meso 一位的氯原子,增强了分子的刚性,并合成了新型分子FS。进一步地,FS通过与两亲性多肽 $\text{P}(\text{OEGMA})_{21}\text{-P}(\text{Asp})_{16}$ 共价偶联形成了纳米胶束PF,PF胶束内部染料分子由于 π - π 堆积引发荧光猝灭,吸收峰略有蓝移至1 026 nm。在808 nm激光照射10 min后,PF可将4T1肿瘤小鼠体内肿瘤温度升高至51.8℃,并展现出42.3%的光热转换效率(图4b)。该研究不仅解决了疏水染料的水溶性与肿瘤靶向性问题,还实现了NIR-II荧光成像与光热治疗的协同功能。

林静教授课题组^[33]开发了一种pH响应型小分子LET-1052,通过质子化诱导 π 共轭体系扩展的策略,实现了吸收波长的显著红移,该分子在碱性/中性条件($\text{pH}=7.4\text{--}8.0$)下吸收峰位于641 nm,而在酸性条件($\text{pH}=5.0$)下则红移到了1 052 nm处。这主要是由于LET-1052分子中的氮原子被质子化,使电子分布发生重排,从而形成了更大的 π 共轭体系,这种共轭体系的扩展显著降低了分子的能隙,从而将吸收峰从可见光区域(641 nm)红移至NIR-II区域(1 052 nm)。同样为了提高光热转换效率、光稳定性以及在水中的溶解性,作者将LET-1052分子封装在DSPE-PEG₂₀₀₀中构建纳米颗粒,该纳米粒子的最大吸收峰值仍保持在1 052 nm处。在1 064 nm激光照射下,LET-1052纳米粒子可在10 min内将4T1小鼠体内肿瘤温度升高52.9℃,并且该探针的光热转换效率高达57.2%(图4c)。相关结果表明,大位阻刚性结构及纳米包载协同提高了分子的光稳定性,并赋予该探针自检式热疗反馈能力。

此外,范曲立教授课题组^[29]通过引入强电子供体4,4'-二甲氧基-4-联苯胺,增强分子内电荷转移效应(ICT),并将苯环环化至3-吡啶锚定基团上,合成了具有更长共轭链和红移吸收峰的小分子CY-1234($\lambda_{\text{abs}}=1\,234\text{ nm}$)。将其包裹于Pluronic F-127聚合物后形成CY-1234 NPs,荧光几乎完全猝灭。在1 064 nm激光照射下,该纳米粒子可在10 min内将4T1肿瘤小鼠的肿瘤温度升高至63℃,光热转换效率高达76.01%(图4d)。展现出优异的光热性能与深层组织穿透能力。

构建J-聚集体也是一种有效的分子调控手段。头尾堆叠所形成的J-聚集分子可显著红移吸收波长、缩小基态(S_0)至第一激发态(S_1)能隙($S_0\rightarrow S_1$),并

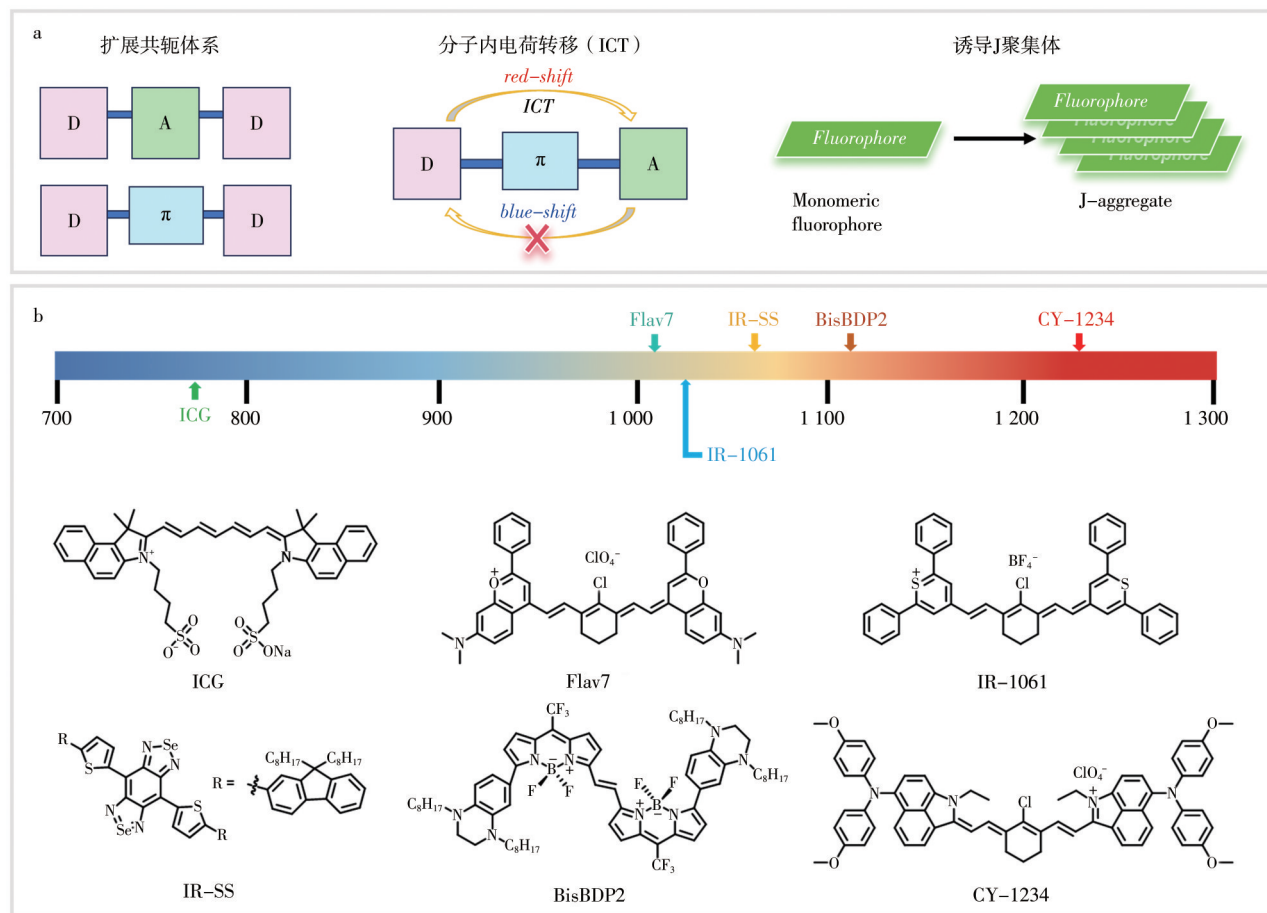


图3 NIR-II吸收型有机小分子光热剂的设计策略及代表性分子^[25-29]

(a) NIR-II吸收型有机小分子光热剂的构建策略; (b) 代表性分子的化学结构及其最大吸收波长

Figure 3 The design strategies of NIR-II-absorbing organic small-molecule photothermal agents and their representative molecules^[25-29]

(a) Design strategies for NIR-II-absorbing organic small-molecule photothermal agents; (b) Chemical structures of representative small molecules and their maximum absorption wavelengths

增强分子振动耦合,从而提升非辐射跃迁效率和光热转换效率^[35]。该策略不仅有效拓展吸收至NIR-II区,也提升了组织穿透深度与成像信噪比,为精准治疗提供了新的途径^[36]。

例如,闫立峰教授团队^[26]通过自组装策略将溴和哌嗪修饰的花菁染料FN与两亲性多肽PEA共组装,构建了J-聚集纳米颗粒P@FN9。与单体FN相比,P@FN9的吸收峰红移了约250 nm,在1 116 nm处吸收峰值达到最大,并且J-聚集后荧光寿命也由0.66 ns缩短至了0.50 ns。在1 064 nm激光照射下,P@FN9使小鼠体内肿瘤温度升至55.9℃,并展现出55.4%的光热转换效率,表明J-聚集可显著增强光热疗效(图4e)。

程震与刘弘光等^[34]采用去溶剂化及热变性方法将IR1061构建为J-聚集体IR1061@HSA,其在甲

醇溶液中最大吸收峰为1 039 nm,形成聚集后吸收带宽化,最大吸收峰达1 060 nm,荧光量子产率为1.15%。在808 nm激光照射下,5 min内小鼠骨肉瘤模型肿瘤温度升至53℃,光热转换效率为51.89%,显示出良好的光热治疗潜力(图4f)。

1.2 基于苯并双噻二唑的小分子光热剂

苯并双噻二唑作为典型的强电子受体单元,具有高度平整的稠环共轭结构和强烈的电子吸引能力,广泛应用于D-A-D结构的有机光电材料设计中^[37]。然而,由于其固有的 π 共轭程度和分子构型限制,传统基于苯并双噻二唑分子的吸收波长往往难以突破1 000 nm,限制了其在NIR-II窗口的光热治疗应用^[38-40]。

为此,研究者们通过结构工程手段提升其光学性能,主要策略包括:1)重原子替代硫原子(如用硒

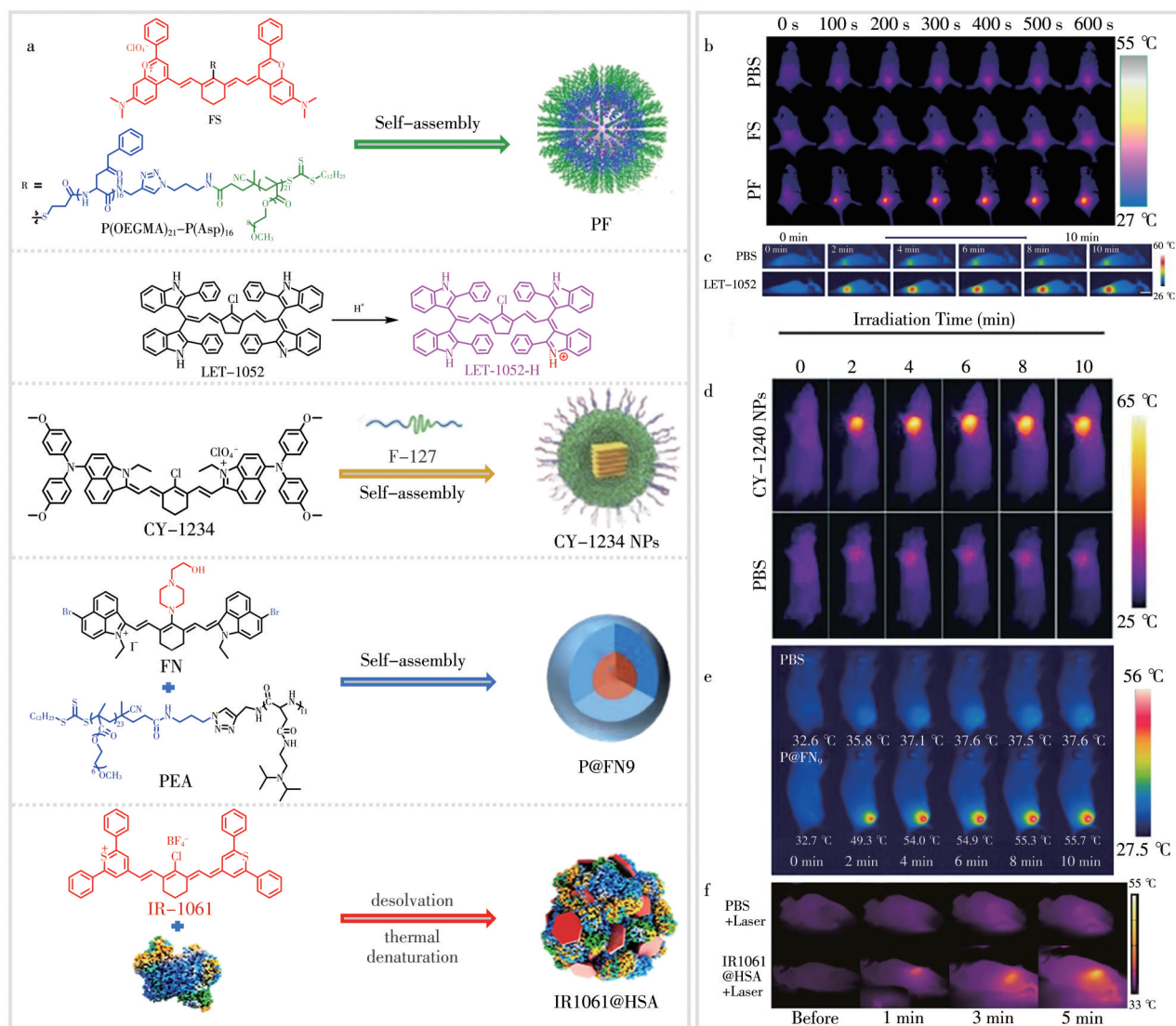


图4 基于花菁的不同分子的化学结构及小鼠在不同波长激光照射期间的红外热图像

(a) PF、LET-1052、CY-1234、FN 和 IR-1061 的分子结构及其纳米颗粒；(b) 负载 PF NPs 的小鼠在 808 nm ($0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 近红外激光照射下的红外热图像^[25]；(c) 负载 LET-1052 NPs 的小鼠在 1064 nm ($0.6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 近红外激光照射下的红外热图像^[33]；(d) 负载 CY-1234 NPs 的小鼠在 1064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 近红外激光照射下的红外热图像^[29]；(e) 负载 P@FN9 NPs 的小鼠在 1064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 近红外激光照射下的红外热图像^[26]；(f) 负载 IR-1061@HSA NPs 的小鼠在 808 nm 近红外激光照射下的红外热图像^[34]

Figure 4 Chemical structures of various cyanine-based molecules and infrared thermal images of mice under laser irradiation at different wavelengths

(a) Molecular structures of PF, LET-1052, CY-1234, FN, and IR-1061, along with their corresponding nanoparticles; (b) Infrared thermal images of mice bearing PF NPs under 808 nm ($0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[25]; (c) Infrared thermal images of mice bearing LET-1052 NPs under 1064 nm ($0.6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[33]; (d) Infrared thermal images of mice bearing CY-1234 NPs under 1064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[29]; (e) Infrared thermal images of mice bearing P@FN9 NPs under 1064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[26]; (f) Infrared thermal images of mice bearing IR-1061@HSA NPs under 808 nm NIR laser irradiation^[34]

或碲增强电子离域)；2) 延展共轭链以降低 HOMO-LUMO 能隙；3) 构建聚集诱导发射 (AIE) 结构以抑制聚集诱导猝灭 (ACQ)^[27,41-43]。

例如, Chun-Sing Lee 和王立代课题组^[27]采用分

子工程策略, 逐步将苯并双噻二唑中的硫 (S) 原子替换为更重的硒 (Se) 原子, 设计合成了三个 D- π -A- π -D 型小分子: IR-TT、IR-TS 和 IR-SS, 通过分别保留 0、1 或 2 个 Se 原子, 评估了重原子效应对吸收性

质的调控。结果表明,吸收峰从 830 nm 逐步红移至 1 060 nm。该红移源于 Se 取代后分子骨架扭曲角度增大,增强共轭平面性与电子离域效应,显著降低了能隙。随后,研究人员采用 DSPE-PEG₂₀₀₀ 将这些染料封装为纳米粒子,进一步促进分子堆积

并放大 Se 替代效应。最终,IR-SS NPs 的最大吸收峰达到 1 120 nm,在 1 064 nm 激光照射下,可在 5 min 内将 4T1 肿瘤小鼠的肿瘤温度升至 63 °C,其光热转换效率高达 77%,显示出优异的光热性能(图 5b)。

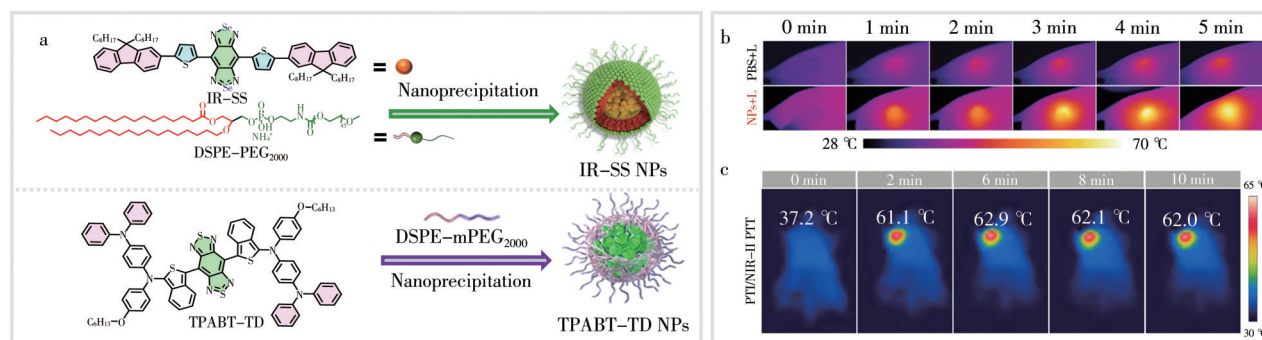


图5 基于苯并双噻二唑的不同分子的化学结构及小鼠在 1 064 nm 激光照射期间的红外热图像 (a)IR-SS 和 TPABT-TD 的分子结构及其纳米颗粒;(b)负载 IR-SS NPs 的小鼠在 1 064 nm ($0.08 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 近红外激光照射下的红外热图像^[27];(c)负载 TPABT-TD NPs 的小鼠在 1 064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 近红外激光照射下的红外热图像^[42]

Figure 5 Chemical structures of benzobisthiadiazole-based molecules and infrared thermal images of mice during 1 064 nm laser irradiation

(a) Molecular structures of IR-SS and TPABT-TD along with their corresponding nanoparticles; (b) Infrared thermal images of mice bearing IR-SS NPs under 1 064 nm ($0.08 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[27]; (c) Infrared thermal images of mice bearing TPABT-TD NPs under 1 064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[42]

然而,增强 π 共轭与堆积效应虽可实现吸收红移,但往往伴随 ACQ 效应,导致荧光猝灭。近年来,聚集诱导发射(AIE)策略被提出用于缓解该问题,通过在分子设计中引入分子转子调控分子内非辐射跃迁,从而同时实现红移与强吸收^[44]。

唐本忠与王东课题组^[42]基于此理念,设计了具有 AIE 特性的 NIR-II 吸收小分子 TPABT-TD。该分子在苯并双噻二唑受体单元两侧引入苯并噻吩和二苯胺供体,通过增强 D-A 效应与扩展 π 共轭体系,将吸收波长红移至 1 010 nm。此外,二苯胺单元作为分子转子,有效抑制分子间 π - π 堆积,从而降低 ACQ 效应。TPABT-TD 被封装成纳米粒子后,在 1 064 nm 激光照射下,6 min 内使 4T1 肿瘤小鼠体内肿瘤温度升至 62.9 °C,光热转换效率达 68.98%(图 5c)。该分子不仅实现了光热治疗功能,同时具备 NIR-II 荧光成像(FLI)、光声成像(PAI)及光热成像(PTI)三种成像模式,显著提高了治疗过程的精准性和可视化程度。

1.3 基于氟硼二吡咯的小分子光热剂

氟硼二吡咯(boron-dipyrrromethene, BODIPY)是一类结构刚性良好、光稳定性优异的荧光染料,由两个吡咯环通过硼-氟桥键连接形成共轭结构^[45]。

其具有高吸收系数、窄带荧光发射和出色的光热稳定性。然而,传统氟硼二吡咯染料的吸收带通常位于可见光区域(450~600 nm)^[46],严重限制了其在深部肿瘤 NIR-II 窗口下的光热治疗应用。

为拓展其应用前沿,研究者们从分子设计层面着手,采用多种策略将其吸收带红移至 NIR-II 区,包括:1)在 β 位或 *meso*-一位引入推-拉电子基团以增强 D-A 作用;2)构建 π 扩展结构以降低能隙;3)利用 J-聚集效应促进光热转化效率的提升。

2021 年,我们课题组^[47]设计并合成了一系列 BODIPY 衍生物(BAF1-4),其中 BAF4 通过强供体-受体(D-A)相互作用显著缩小 HOMO-LUMO 能隙,使其吸收波长成功拓展至 NIR-II 窗口。特别值得指出的是,四苯乙烯(TPE)供体单元的引入不仅增强了分子内自由转动,促进了激发态非辐射跃迁,还通过其扭曲构型有效抑制了染料间的 π - π 堆积现象。BAF4 的刚性氮杂黄酮骨架提供了稳定的平面结构,封装为纳米颗粒(BAF4 NPs)后吸收峰略微红移至 1 003 nm。在 1 064 nm 激光照射下,BAF4 NPs 展现出突破性的深部肿瘤治疗能力,可有效穿透并治疗深度达 3 cm 的肿瘤组织,远超传统 NIR-I 窗口(如 808 nm)1~2 cm 的治疗极限。实验

表明,BAF4 NPs在10 min内可使4T1小鼠肿瘤温度升至51℃,并实现高达80%的光热转换效率,同时在深部肝肿瘤模型中能将肿瘤温度提升至47℃(808 nm仅36℃),最终实现肿瘤完全消融且无复发(图6b)。结合其光声成像功能和EPR靶向效应,该研究为临床深部肿瘤治疗提供了创新性解决方案。

随后,唐本忠与樊江莉课题组^[48]同样利用氮杂黄酮二聚体骨架构建了NIR-II吸收小分子光热剂OTTBF。通过引入推拉电子体系增强 π 共轭效应,OTTBF的吸收波长实现显著红移。纳米粒子形式

的OTTBF NPs在1 064 nm激光照射下,于7 min内使肿瘤温度升至58.6℃,光热转换效率为54.1%(图6c)。该研究进一步验证了BODIPY衍生物在NIR-II窗口下实现高效光热转化的可行性,为精准肿瘤治疗提供了坚实的基础。

为了探索更多以BODIPY分子骨架为主的NIR-II吸收型染料,我们课题组^[28]设计了一种具有优异J-聚集能力的乙烯基桥连式BODIPY骨架(BisBDP1),该骨架的*meso*-一位引入了强吸电子基团三氟甲基(-CF₃)。为了使吸收波长进一步红移,

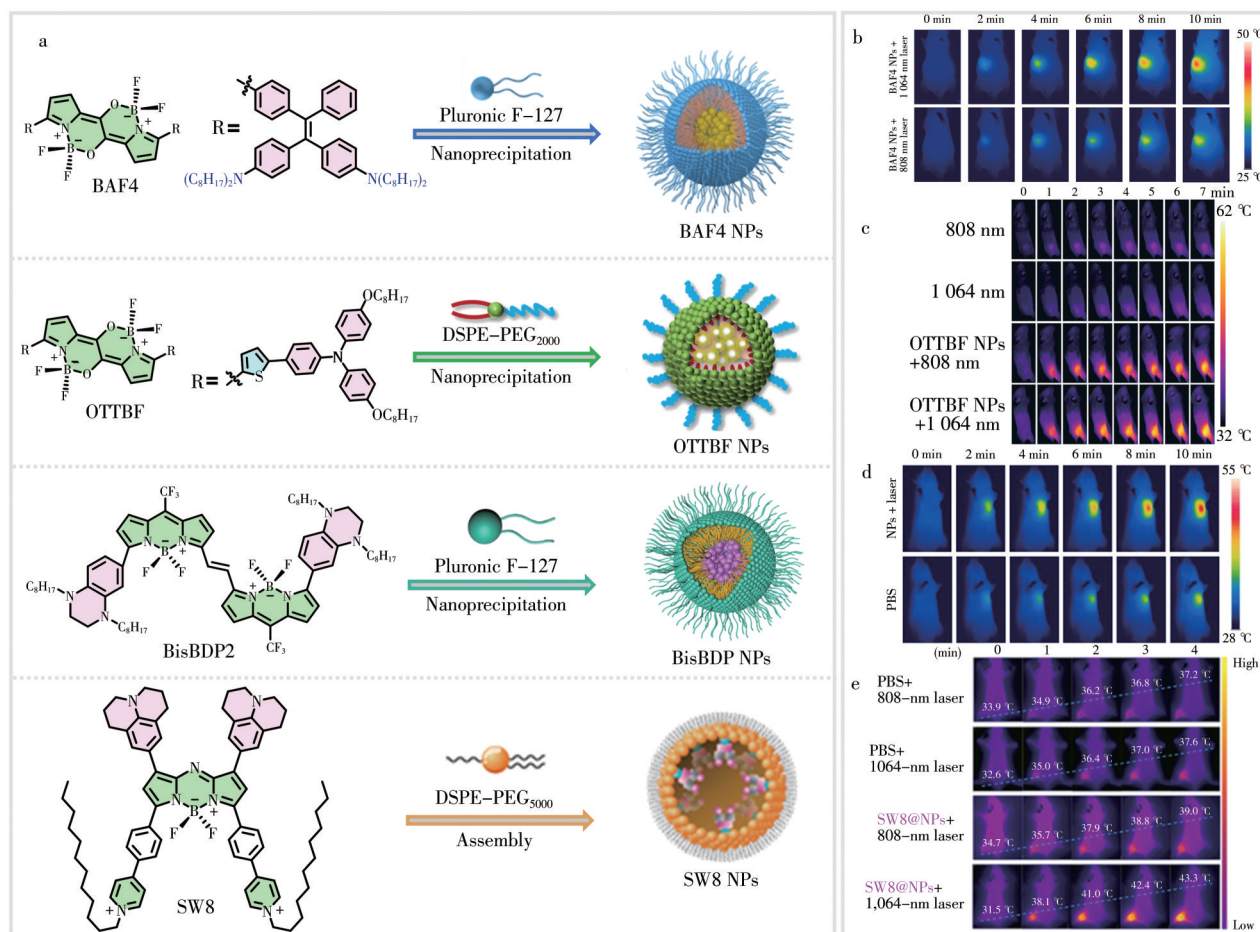


图6 基于氟硼二吡咯的不同分子的化学结构及小鼠在不同激光照射期间的红外热图像

(a)BAF4、OTTBF、BisBDP2和SW8的分子结构及其纳米颗粒;(b)负载BAF4 NPs的小鼠在1 064 nm($0.75 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)近红外激光照射下的红外热图像^[47];(c)负载OTTBF NPs的小鼠在1 064 nm($0.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)近红外激光照射下的红外热图像^[48];(d)负载BisBDP2 NPs的小鼠在1 208 nm($0.8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)近红外激光照射下的红外热图像^[28];(e)负载SW8 NPs的小鼠在1 064 nm($0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)近红外激光照射下的红外热图像^[49]

Figure 6 Chemical structures of BODIPY-based molecules and infrared thermal images of mice under laser irradiation at different wavelengths

(a) Molecular structures of BAF4, OTTBF, BisBDP2, and SW8 along with their corresponding nanoparticles; (b) Infrared thermal images of mice bearing BAF4 NPs under 1 064 nm ($0.75 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[47]; (c) Infrared thermal images of mice bearing OTTBF NPs under 1 064 nm ($0.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[48]; (d) Infrared thermal images of mice bearing BisBDP2 NPs under 1 208 nm ($0.8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[28]; (e) Infrared thermal images of mice bearing SW8 NPs under 1 064 nm ($0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) NIR laser irradiation^[49]

在BODIPY的 α 位引入了四氢基喹啉(THQ)这一强电子供体,构建了一个D-A- π -A-D结构的染料(BisBDP2)。BisBDP2的最大吸收波长为1 112 nm,与BisBDP1相比表现出了352 nm的红移,这是首个已知的单体分子最大吸收波长超过1 100 nm的小分子BODIPY染料。通过将BisBDP2 J-聚集体封装成纳米颗粒,该J-聚集体的最大吸收波长进一步红移至1 273 nm,使其成为NIR-II窗口的理想光热剂。在光热性能测试中,我们比较了808 nm、1 064 nm和1 208 nm激光的穿透深度和光热转换效率。实验结果表明,1 208 nm激光在组织中的功率衰减系数($\alpha=0.586$)显著低于1 064 nm($\alpha=0.652$)和808 nm($\alpha=0.957$)激光。这种更低的衰减系数使得1 208 nm激光能够穿透更深层的组织,从而实现更高效的光热治疗。在1 208 nm激光照射下,BisBDP2 NPs在10 min内将肝癌小鼠体内肿瘤温度升至49 °C,并表现出高达63%的光热转换效率(图6d)。相比之下,808 nm和1 064 nm激光在相同条件下对组织的穿透深度和温度提升效果均逊于1 208 nm激光。

这些结果不仅证明了扩展 π 共轭体系与推拉电子效应的协同作用能够显著红移吸收波长,还凸显了1 208 nm激光在深层组织光热治疗中的独特优势。

BisBDP2染料的发展为NIR-II窗口的BODIPY染料研究开辟了新路径,并为未来生物光子学应用提供了高效的光热治疗工具。

此外,李林课题组^[49]提出了一种非对称分子设计策略,构建了aza-BODIPY骨架的D-A-A'结构染料(SW6-SW8),通过将供体位点(3,5位)引入强电子受体,打破传统D-A-D设计框架。其中,SW8由于受体增强效应和长链烷基的共同作用,使其吸收波长有效红移至NIR-II区域。将SW8封装成纳米粒子后,其吸收峰红移至1 064 nm,并表现出显著J-聚集特性。在1 064 nm激光照射下,SW8@NPs可在4 min内使骨肉瘤小鼠体内肿瘤温度升至43.3 °C,光热转换效率达75%(图6e)。该策略不仅丰富了BODIPY在NIR-II分子设计中的结构构建思路,也为调控光物理性质提供了新的理论与实践依据。

1.4 其他结构的有机小分子光热剂

除花菁(Cyanine)、苯并双噻二唑(BBTD)和氟硼二吡咯(BODIPY)等经典染料结构外,近年来研究者们也开发了多种其他骨架的新型有机小分子光热剂^[50-54](图7)。这些分子在结构设计上具有高度灵活性,吸收波长可调性强,部分分子在NIR-II区域表现出优异的光热转换性能,为拓展深部组织治疗提供了丰富的分子平台。

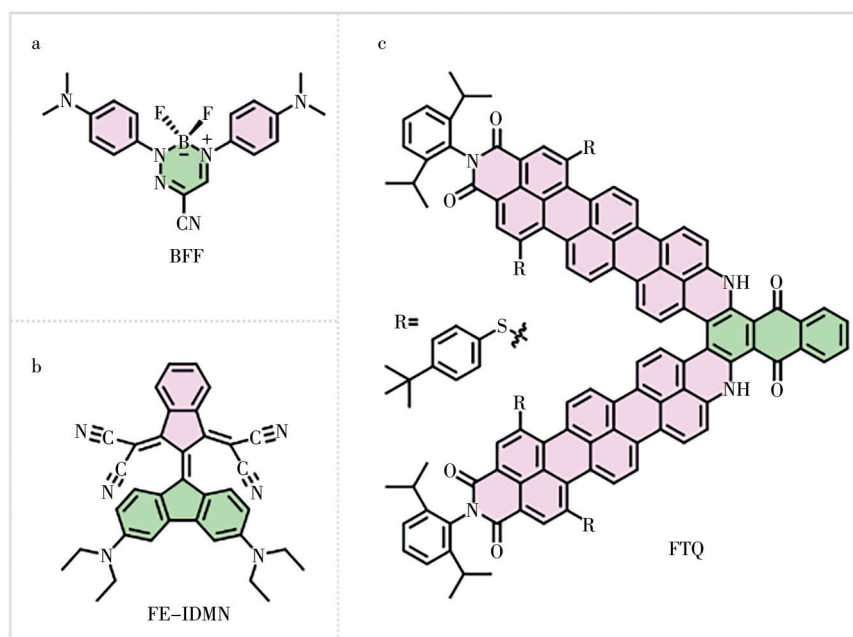


图7 基于其他母核的不同分子的化学结构

(a)BFF的分子结构^[50]; (b)FE-IDMN的分子结构^[51]; (c)FTQ的分子结构^[52]

Figure 7 Chemical structures of diverse small molecules based on different core scaffolds

(a) Molecular structure of BFF^[50]; (b) Molecular structure of FE-IDMN^[51]; (c) Molecular structure of FTQ^[52]

例如,赵彦利和陈雨课题组^[50]基于结构简单的BFF为单体分子,通过自组装封装形成纳米粒子,其吸收峰显著红移至NIR-II区(图7a)。在1 064 nm ($1.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)激光照射下,该纳米粒子的光热转换效率达到34.3%,同时展现出良好的化学稳定性与光热稳定性,为低成本、结构可调型NIR-II小分子光热剂的开发提供了新思路。

李坤课题组^[51]则以3,6-双乙氨基-9H-芴酮(FE)为母核,利用D- π -A结构设计策略,将其 meso -一位羰基替换为具有强电子拉力的C=C双键,引入受体单元IDMN,构建出新型分子FE-IDMN(图7b)。该分子封装为纳米粒子后,其最大吸收波长达1 050 nm,在808 nm ($0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)激光照射下,该纳米粒子的光热转换效率高达82.6%,在多个光热性能指标上优于传统结构。此外,FE-IDMN具备分子量小、结构简单、合成简便等特点,显示出良好的应用前景。

尹梅贞及其同事^[52]以二联萘-3,4-二甲酰亚胺(TMI)为核心受体构建了NIR-II区小分子探针FTQ(图7c),该分子通过构建D-A-D型结构有效拓展 π 共轭体系,使其最大吸收波长达到1 140 nm。FTQ纳米粒子在1 064 nm ($1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)激光照射下的光热转换效率高达49%,并已初步展现出在原位肝癌治疗中的应用潜力。

2 总结与展望

NIR-II区吸收型有机小分子光热剂,因其优异的光热转换效率、生物相容性及分子结构可控性,已成为近年来光热治疗领域的研究热点。相比传统NIR-I光热剂,NIR-II小分子光热剂在组织穿透深度、成像信噪比及治疗精准性等方面具有显著优势,尤其在深部肿瘤治疗中展现出巨大潜力。

本文重点介绍了三类主流分子平台:花菁类、苯并双噻二唑类及氟硼二吡咯类染料。通过分子设计策略的持续优化,包括扩展 π 共轭体系、调控分子内电荷转移(ICT)、构建J-聚集体,以及引入刚性结构与推拉电子基团等手段,研究者们已成功实现了NIR-II窗口下的光热响应。此外,针对单体分子存在的水溶性差、聚集诱导猝灭(ACQ)及靶向能力弱等问题,研究者普遍采用以下优化路径:1)疏水单体的亲水修饰,如接枝PEG等水溶性基团,提高血液循环稳定性与生物分布一致性;2)构建纳米胶束或纳米粒子,如利用两亲性聚合物或多肽封装,提升分子稳定性、光热转换效率及组织靶向能力;3)诱导J

聚集或分子组装,缩小能隙,促进非辐射跃迁,显著增强光热转化效率。

尽管该领域取得了诸多重要进展,但仍面临着若干关键挑战有待克服。

(1)光稳定性与代谢性的平衡问题。为实现NIR-II吸收,通常需设计大共轭体系或引入强D-A结构,但这类分子在强光照下易发生光降解,同时也存在分子降解产物毒性不明、代谢路径不清等问题。传统手段,如与高分子组装虽可提高稳定性,却可能导致难以代谢、长期滞留体内等潜在风险。因此,未来应聚焦于新型代谢友好型结构单元的设计,兼顾光热性能与生物可降解性。

(2)治疗机制的精准性与安全性问题。当前PTT主要依赖局部高温(如 $>50^\circ\text{C}$)诱导肿瘤细胞凋亡或坏死,但温度阈值的不确定性以及热扩散可能引发邻近健康组织的损伤^[55]。此外,不同肿瘤微环境(如缺氧、酸性)对热敏感性存在显著差异。因此,亟需联合多模态成像与温度实时监测,发展可自评估、可调控的PTT体系,提高治疗特异性与安全性。

(3)临床转化障碍。尽管已有部分NIR-II光热剂展现出良好的光热疗效和生物学行为,但距临床应用仍存在明显差距,药物GMP级(Good Manufacturing Practice)合成难度、长期毒性评价不足、靶向机制缺乏临床可重复性等。因此,未来研究需聚焦于标准化分子平台、剂型开发与药理机制系统研究,并推进大动物模型下的长期有效性与安全性验证,为临床前评估提供充分依据。

综上所述,NIR-II吸收型有机小分子光热剂以其结构灵活性、高光热转换效率、优异生物相容性以及清晰代谢特性,在深部肿瘤精准治疗中展现出广阔前景。随着分子设计策略的持续优化与生物医学工程技术的不断发展,未来可望实现从“单模态热疗”向“多模态集成诊疗”的转变,为个体化、精准化癌症治疗提供有力支撑。

参考文献:

- [1] SIEGEL R L, MILLER K D, WAGLE N S, *et al.* Cancer statistics, 2023[J]. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2023, 73(1): 17-48. DOI: 10.3322/caac.21763.
- [2] JUNG H S, VERWILST P, SHARMA A, *et al.* Organic molecule-based photothermal agents: an expanding photothermal therapy universe[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(7): 2280-2297. DOI: 10.1039/

- C7CS00522A.
- [3] LIU Y, BHATTARAI P, DAI Z, *et al.* Photothermal therapy and photoacoustic imaging via nanotheranostics in fighting cancer[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(7): 2053-2108. DOI: 10.1039/C8CS00618K.
- [4] LI J, PU K. Development of organic semiconducting materials for deep-tissue optical imaging, phototherapy and photoactivation[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(1): 38-71. DOI: 10.1039/C8CS00001H.
- [5] HUO J, JIA Q, HUANG H, *et al.* Emerging photothermal-derived multimodal synergistic therapy in combating bacterial infections[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(15): 8762-8789. DOI: 10.1039/D1CS00074H.
- [6] GOBIN A M, WATKINS E M, QUEVEDO E, *et al.* Near-Infrared-Resonant Gold/Gold Sulfide Nanoparticles as a Photothermal Cancer Therapeutic Agent[J]. *Small*, 2010, 6(6): 745-752. DOI: 10.1002/smll.200901557.
- [7] HAN H S, CHOI K Y, LEE H, *et al.* Gold-Nanoclustered Hyaluronan Nano-Assemblies for Photothermally Maneuvered Photodynamic Tumor Ablation[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 10858-10868. DOI: 10.1021/acsnano.6b05113.
- [8] LIU S, PAN X, LIU H. Two-Dimensional Nanomaterials for Photothermal Therapy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(15): 5890-5900. DOI: 10.1002/anie.201911477.
- [9] ZHANG H, YANG M, WU Q, *et al.* Engineering Two-Dimensional Nanomaterials for Photothermal Therapy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, n/a(n/a): e202424768. DOI: 10.1002/anie.202424768.
- [10] MOON H K, LEE S H, CHOI H C. In Vivo Near-Infrared Mediated Tumor Destruction by Photothermal Effect of Carbon Nanotubes[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(11): 3707-3713. DOI: 10.1021/nn900904h.
- [11] WU M-C, DEOKAR A R, LIAO J-H, *et al.* Graphene-Based Photothermal Agent for Rapid and Effective Killing of Bacteria[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1281-1290. DOI: 10.1021/nn304782d.
- [12] LI B, YE K, ZHANG Y, *et al.* Photothermal Theragnosis Synergistic Therapy Based on Bimetal Sulphide Nanocrystals Rather Than Nanocomposites[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(8): 1339-1345. DOI: 10.1002/adma.201404257.
- [13] BIAN Y, HU T, ZHAO K, *et al.* A LDH-Derived Metal Sulfide Nanosheet-Functionalized Bioactive Glass Scaffold for Vascularized Osteogenesis and Periprosthetic Infection Prevention/Treatment[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(39): 2403009. DOI: 10.1002/advsc.202403009.
- [14] JIANG Y, UPPUTURI P K, XIE C, *et al.* Metabolizable Semiconducting Polymer Nanoparticles for Second Near-Infrared Photoacoustic Imaging[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(11): 1808166. DOI: 10.1002/adma.201808166.
- [15] LIU Y, LIU J, CHEN D, *et al.* Fluorination Enhances NIR-II Fluorescence of Polymer Dots for Quantitative Brain Tumor Imaging[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(47): 21049-21057. DOI: 10.1002/anie.202007886.
- [16] SHENG Z, HU D, XUE M, *et al.* Indocyanine Green Nanoparticles for Theranostic Applications[J]. *Nano-Micro Letters*, 2013, 5(3): 145-150. DOI: 10.1007/BF03353743.
- [17] LI Z, LI Z, RAMOS A, *et al.* Detection of pancreatic cancer by indocyanine green-assisted fluorescence imaging in the first and second near-infrared windows[J]. *Cancer Communications*, 2021, 41(12): 1431-1434. DOI: 10.1002/cac2.12236.
- [18] XIA W L, RAN X Y, XIE K P, *et al.* Optimized indocyanine green nanopreparations for biomedical applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, 528: 216422. DOI: 10.1016/j.ccr.2024.216422.
- [19] SHAN W, CHEN R, ZHANG Q, *et al.* Improved Stable Indocyanine Green (ICG)-Mediated Cancer Optotheranostics with Naturalized Hepatitis B Core Particles[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(28): 1707567. DOI: 10.1002/adma.201707567.
- [20] KWON N, JASINEVICIUS G O, KASSAB G, *et al.* Nanostructure-Driven Indocyanine Green Dimerization Generates Ultra-Stable Phototheranostics Nanoparticles[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(28): e202305564. DOI: 10.1002/anie.202305564.
- [21] JIANG J, HU J, LI M, *et al.* NIR-II Fluorescent Thermophoretic Nanomotors for Superficial Tumor Photothermal Therapy[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(10): 2417440. DOI: 10.1002/adma.202417440.
- [22] MU X, LU Y, WU F, *et al.* Supramolecular Nanodiscs Self-Assembled from Non-Ionic Heptamethine Cyanine for Imaging-Guided Cancer Photothermal Therapy[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(2): 1906711. DOI: 10.1002/adma.201906711.
- [23] YANG C, GUO L, ZHANG K, *et al.* Diradical-Featured Organic Small-Molecule Photothermal Material Based on 4,6-di(2-thienyl)thieno[3,4-c][1,2,5]thiadiazole for Photothermal Immunotherapy[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(52): 2306360.

- DOI: 10.1002/adfm.202306360.
- [24] CHENG H B, CAO X, ZHANG S, *et al.* BODIPY as a Multifunctional Theranostic Reagent in Biomedicine: Self-Assembly, Properties, and Applications[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(18): 2207546. DOI: 10.1002/adma.202207546.
- [25] LI T, LI C, RUAN Z, *et al.* Polypeptide-Conjugated Second Near-Infrared Organic Fluorophore for Image-Guided Photothermal Therapy[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(3): 3691-3702. DOI: 10.1021/acsnano.9b00452.
- [26] TENG C, DANG H, ZHANG S, *et al.* J-aggregates of Br- and piperazine-modified cyanine dye with the assistance of amphiphilic polypeptides for efficient NIR-IIa phototheranostics under 1 064 nm irradiation[J]. *Acta Biomaterialia*, 2022, 154: 572-582. DOI: 10.1016/j.actbio.2022.10.025.
- [27] LI S, DENG Q, ZHANG Y, *et al.* Rational Design of Conjugated Small Molecules for Superior Photothermal Theranostics in the NIR-II Biowindow[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(33): 2001146. DOI: 10.1002/adma.202001146.
- [28] WANG X, JIANG Z, LIANG Z, *et al.* Discovery of BODIPY J-aggregates with absorption maxima beyond 1 200 nm for biophotonics[J]. *Science Advances*, 8(48): eadd5660. DOI: 10.1126/sciadv.add5660.
- [29] WANG Z, LIU Y, HE C, *et al.* Small-Molecule Phototheranostic Agent with Extended π -Conjugation for Efficient NIR-II Photoacoustic-Imaging-Guided Photothermal Therapy[J]. *Small*, 2024, 20(17): 2307829. DOI: 10.1002/smll.202307829.
- [30] MISHRA A, BEHERA R K, BEHERA P K, *et al.* Cyanines during the 1990s: A Review[J]. *Chemical Reviews*, 2000, 100(6): 1973-2012. DOI: 10.1021/cr990402t.
- [31] COSCO E D, CARAM J R, BRUNS O T, *et al.* Flavylum Polymethine Fluorophores for Near- and Shortwave Infrared Imaging[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(42): 13126-13129. DOI: 10.1002/anie.201706974.
- [32] LI B, LU L, ZHAO M, *et al.* An Efficient 1 064 nm NIR-II Excitation Fluorescent Molecular Dye for Deep-Tissue High-Resolution Dynamic Bioimaging[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(25): 7483-7487. DOI: 10.1002/anie.201801226.
- [33] LI B, LIU H, HE Y, *et al.* A "Self-Checking" pH/Viscosity-Activatable NIR-II Molecule for Real-Time Evaluation of Photothermal Therapy Efficacy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(16): e202200025. DOI: 10.1002/anie.202200025.
- [34] DU B, LIU R, QU C, *et al.* J-aggregates albumin-based NIR-II fluorescent dye nanoparticles for cancer phototheranostics[J]. *Materials Today Bio*, 2022, 16: 100366. DOI: 10.1016/j.mtbio.2022.100366.
- [35] XU J, ZHENG X, REN T B, *et al.* Recent advances in near-infrared-II organic J-aggregates for bio-applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, 528: 216379. DOI: 10.1016/j.ccr.2024.216379.
- [36] CHEN W, CHENG C A, COSCO E D, *et al.* Short-wave Infrared Imaging with J-Aggregates Stabilized in Hollow Mesoporous Silica Nanoparticles[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(32): 12475-12480. DOI: 10.1021/jacs.9b05195.
- [37] GU H, LIU W, LI H, *et al.* 2, 1, 3-Benzothiadiazole derivative AIEgens for smart phototheranostics[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2022, 473: 214803. DOI: 10.1016/j.ccr.2022.214803.
- [38] ANTARIS A L, CHEN H, CHENG K, *et al.* A small-molecule dye for NIR-II imaging[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(2): 235-242. DOI: 10.1038/nmat4476.
- [39] FANG Y, SHANG J, LIU D, *et al.* Design, Synthesis, and Application of a Small Molecular NIR-II Fluorophore with Maximal Emission beyond 1 200 nm[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(36): 15271-15275. DOI: 10.1021/jacs.0c08187.
- [40] CHEN P, QU F, CHEN S, *et al.* Bandgap Modulation and Lipid Intercalation Generates Ultrabright D-A-D-Based Zwitterionic Small-Molecule Nanoagent for Precise NIR-II Excitation Phototheranostic Applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(52): 2208463. DOI: 10.1002/adfm.202208463.
- [41] HU Z, FENG L, YANG P. 2, 1, 3-Benzothiadiazole Derivative Small Molecule Fluorophores for NIR-II Bioimaging[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(16): 2310818. DOI: 10.1002/adfm.202310818.
- [42] YAN D, ZHANG Z, ZHANG J, *et al.* An All-Rounder for NIR-II Phototheranostics: Well-Tailored 1 064 nm-Excitable Molecule for Photothermal Combating of Orthotopic Breast Cancer[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(26): e202401877. DOI: 10.1002/anie.202401877.
- [43] HE Z, GAO Y, HUANG Z, *et al.* Tuning the Near-Infrared J-Aggregate of a Multicationic Photosensitizer through Molecular Coassembly for Symbiotic Photothermal Therapy and Chemotherapy[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(10): 10220-10231. DOI: 10.1021/acsnano.

- 4c17582.
- [44] KANG M, ZHANG Z, SONG N, *et al.* Aggregation-enhanced theranostics: AIE sparkles in biomedical field [J]. *Aggregate*, 2020, 1(1): 80-106. DOI: 10.1002/agt2.7.
- [45] TREIBS A, KREUZER F-H. Difluoroboryl-Komplexe von Di- und Tripyrrylmethenen[J]. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 1968, 718(1): 208-223. DOI: 10.1002/jlac.19687180119.
- [46] LU H, MACK J, YANG Y, *et al.* Structural modification strategies for the rational design of red/NIR region BODIPYs[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(13): 4778-4823. DOI: 10.1039/C4CS00030G.
- [47] JIANG Z, ZHANG C, WANG X, *et al.* A Borondifluoride-Complex-Based Photothermal Agent with an 80% Photothermal Conversion Efficiency for Photothermal Therapy in the NIR-II Window[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(41): 22376-22384. DOI: 10.1002/anie.202107836.
- [48] YANG M, OU X, LI J, *et al.* BF₂-Bridged Azafulvene Dimer-Based 1 064 nm Laser-Driven Superior Photothermal Agent for Deep-Seated Tumor Therapy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(34): e202407307. DOI: 10.1002/anie.202407307.
- [49] SHI Z, BAI H, WU J, *et al.* Acceptor Engineering Produces Ultrafast Nonradiative Decay in NIR-II Aza-BODIPY Nanoparticles for Efficient Osteosarcoma Photothermal Therapy via Concurrent Apoptosis and Pyroptosis[J]. *Research*, 2023, 6: 0169. DOI: 10.34133/research.0169.
- [50] XIANG H, ZHAO L, YU L, *et al.* Self-assembled organic nanomedicine enables ultrastable photo-to-heat converting theranostics in the second near-infrared bio-window [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 218. DOI: 10.1038/s41467-020-20566-6.
- [51] LIU Y Z, RAN X Y, ZHOU D H, *et al.* Novel Dibenzofulvene-Based NIR-II Emission Photothermal Agent with an 82.6% Photothermal Conversion Efficiency for Photothermal Therapy [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(8): 2311365. DOI: 10.1002/adfm.202311365.
- [52] WU Z H, PENG M, JI C, *et al.* A Terrylene-Anthraquinone Dyad as a Chromophore for Photothermal Therapy in the NIR-II Window[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(48): 26487-26493. DOI: 10.1021/jacs.3c11314.
- [53] MAURYA Y K, CHMIELEWSKI P J, CYBIŃSKA J, *et al.* Naphthalimide-Fused Dipyrins: Tunable Halochromic Switches and Photothermal NIR-II Dyes[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(19): 2105886. DOI: 10.1002/advs.202105886.
- [54] TIAN S, BAI H, LI S, *et al.* Water-Soluble Organic Nanoparticles with Programable Intermolecular Charge Transfer for NIR-II Photothermal Anti-Bacterial Therapy [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(21): 11758-11762. DOI: 10.1002/anie.202101406.
- [55] ZHANG Y, ZHAN X, XIONG J, *et al.* Temperature-dependent cell death patterns induced by functionalized gold nanoparticle photothermal therapy in melanoma cells[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8720. DOI: 10.1038/s41598-018-26978-1.



刘志鹏,男,现任南京林业大学教授,博士研究生导师,功能发光材料课题组组长,江苏省“333高层次人才培养工程”中青年科学技术带头人,青海省“昆仑英才·高端创业人才”项目柔性引进拔尖人才。主要研究领域为小分子探针,包括:开发具有活体高时空分辨成像能力的分子探针,实现金属相关信号分子的高时空在体分析,阐释其器官间信号传递功能和调控机制。至今,以第一或通信作者发文共80余篇,以通信作者在包括 *J. Am. Soc. Chem.*, *Angew. Chem.*, *Sci. Adv.*, *Nat. Commun.*, *Chem. Soc. Rev.* 在内的高影响力期刊发表研究论文80余篇;授权中国专利8件。主持国家自然科学基金项目3项、省部级科研项目2项,作为技术负责人参与国家重点研发项目1项。曾获山东省化学化工学会科学技术三等奖;担任中国化学会 *Chinese Chemical Letters* 期刊编委会委员,美国化学会 *Chemical & Biomedical Imaging* 期刊 Early Career Advisory Board (ECAB) 成员。Email: zpliu@njfu.edu.cn

(责任编辑:张伟杰)