

文章编号: 1000-7032(2026)09-1551-18

镧系金属有机框架材料在防伪中的应用

赵 迪, 李焕荣*

(河北工业大学 化工学院, 天津 300401)

摘要: 信息安全与防伪技术在金融、商品流通及公共安全中至关重要, 而传统依赖单一光学特征的防伪方式已难以应对不断升级的伪造手段。镧系金属有机框架(*Ln*-MOFs)因其高亮度、长寿命、窄带发射及对光、热、酸碱等刺激的可调响应, 成为构建多模态光学防伪体系的理想材料。本文综述了 *Ln*-MOFs 的发光机制、结构设计与刺激响应调控策略, 总结了其在多重加密标签、动态二维码及复合防伪平台中的典型应用。最后讨论了稳定性、智能化和挖掘孔道潜力等关键挑战, 并展望了 *Ln*-MOFs 在先进防伪与信息存储领域的发展前景。

关键词: 镧系金属有机框架材料; 刺激响应; 发光机制; 多模态防伪

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3724/CJL.20260064

CSTR: 32170.14.CJL.20260064

Lanthanide Metal-Organic Frameworks for
Anti-counterfeiting Applications

ZHAO Di, LI Huanrong*

(School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

* Corresponding Author, E-mail: lihuanrong@hebut.edu.cn

Abstract: Information security and anti-counterfeiting technologies are essential for financial systems, commodity circulation, and public safety. However, traditional anti-counterfeiting strategies based on single and static optical features are increasingly insufficient against rapidly evolving counterfeiting techniques. Lanthanide metal-organic frameworks (*Ln*-MOFs), featuring high brightness, long decay lifetimes, narrow-band emissions, and tunable responses to light, temperature, pH, and other stimuli, have emerged as ideal candidates for constructing multimodal optical security systems. This review summarizes the luminescence mechanisms, structural design principles, and stimulus-responsive regulation strategies of *Ln*-MOF, and highlights their representative applications in multi-level encrypted labels, dynamic QR codes, and composite anti-counterfeiting platforms. Key challenges related to stability, intelligence, and tapping the potential of pore channels are discussed, and future development directions of *Ln*-MOFs in advanced anti-counterfeiting and information storage technologies are outlined.

Keywords: lanthanide metal-organic frameworks; stimulus response; luminescence mechanism; multimodal anti-counterfeiting

1 引 言

假冒伪劣产品的泛滥已对全球经济、安全与公共健康造成严重威胁^[1-4]。传统防伪技术, 如水印、二维码及静态荧光标签, 虽然应用广泛, 但其

信息输出单一、易被复制或破解, 难以满足现代信息安全对高复杂度与动态可验证性的需求。因此, 开发具有可设计性、高安全等级与多维光学响应的先进防伪材料成为当前研究热点^[5-6]。近年来, 有机染料、量子点及聚集诱导发光(AIE)材料

等多种发光体系已被广泛应用于光学防伪领域^[7-9]。然而,这些材料在实际应用中仍存在一定局限性。例如,有机染料易发生光漂白且环境稳定性较差,量子点体系可能涉及重金属毒性问题,而部分 AIE 材料在发射带宽及多维信息编码能力方面仍存在一定限制^[10-11]。因此,开发兼具高稳定性、窄带发射特性及多模态响应能力的新型发光材料,对于提升防伪体系的安全性及复杂性具有重要意义。

在众多发光材料中,镧系发光体系凭借其窄带发射、长寿命、高量子效率与可辨识光谱特征而备受关注^[12-15]。镧系离子(Ln^{3+})通常以+3价形式存在,其未填满的4f电子壳层($4f^n$)及丰富的能级结构使其能够覆盖可见光到近红外的宽范围发光。由于4f电子受到外层 $5s^25p^6$ 轨道的有效屏蔽,其跃迁过程受外界环境影响较小,从而赋予镧系发光材料窄带发射、长寿命、高色纯度及大斯托克斯位移等显著优势^[16]。然而,传统镧系材料(如配合物、无机荧光粉)存在热稳定性不足、易发生非辐射猝灭及难以进一步结构功能化等问题,限制了其在复杂防伪体系中的应用^[17]。将镧系离子引入金属有机框架(MOF)中构筑镧系金属有机框架材料(Ln -MOFs),为解决上述问题提供了有效途径^[18-20]。 Ln -MOFs是一类由镧系离子与有机配体通过配位作用构筑的晶态多孔材料,其中 Ln^{3+} 通常具有8~12的配位数,并与含氧官能团(如一COOH、—OH)形成稳定配位结构^[21]。MOF的刚性骨架可有效抑制配体振动与环境猝灭,提高发光稳定性;其有机配体通过“天线效应”实现能量的高效吸收与传递,从而显著增强 Ln^{3+} 发光效率。此外, Ln -MOFs具有同结构异金属特性,可在单相材料中实现多色发光,而其孔道结构不仅可调控发光中心的微环境,还可通过引入客体分子实现进一步功能化^[22]。通过调节配体结构、 Ln^{3+} 掺杂比例及功能客体分子的主-客体相互作用, Ln -MOFs能够对光、热、湿度及化学刺激产生可逆或条件式响应^[23-26],从而实现动态信息加密、可控解密和多模态验证,大幅提升了防伪体系的安全等级^[27-29]。

在防伪材料的实际应用中,其性能优劣不仅取决于发光特性本身,还与多维度的应用评价指标密切相关。例如,加密复杂度决定了信息编码的层级与破解难度;响应速度影响防伪信息的读取效率;可逆性与循环稳定性关系到材料的重复

使用能力与长期可靠性;识别便捷性则直接影响其在实际场景中的可操作性与推广潜力。因此,从“材料设计-性能指标-防伪应用”之间建立系统关联,对于指导高性能防伪体系的构建具有重要意义。 Ln -MOFs凭借其结构可设计性与多模态响应特性,在上述多个关键指标中展现出独特优势。尽管已有关于MOF材料或镧系发光材料的综述报道,近期也有研究对 Ln -MOFs在防伪领域的应用进行了系统总结,但从刺激响应调控与多材料集成相结合的角度对其进行系统梳理的工作仍相对有限^[30-34]。基于此,本文总结了 Ln -MOFs在防伪领域的最新研究进展,重点讨论刺激响应型 Ln -MOF的结构设计策略、能量转移与多材料集成体系,以及其在智能防伪体系中的设计理念和典型应用。同时,我们分析了当前 Ln -MOFs在稳定性、可加工性及规模化制备方面面临的挑战,并对其在高安全信息存储与下一代防伪技术中的发展方向进行了展望。

2 Ln -MOFs的结构特性与发光机制

目前已有大量经典综述系统阐述了镧系元素及MOF材料的基本特性,但为了增强本文的整体连贯性和可读性,仍有必要对相关概念进行简要回顾^[35]。镧系离子通常以+3价形式存在,其未填满的4f电子壳层($4f^n$)及丰富的能级结构使其能够实现覆盖可见光至近红外区域的特征发光(在特定体系中亦可扩展至紫外区)。例如, Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 和 Dy^{3+} 分别对应橙色、红色、绿色和黄色发射,而 Yb^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 等则表现出近红外发光特性^[36-37]。由于4f电子受到外层 $5s^25p^3$ 轨道的有效屏蔽,其跃迁过程受外界环境影响较小,从而赋予镧系发光材料窄带发射、长寿命、高色纯度及良好光化学稳定性等显著优势。然而,由于4f-4f跃迁属于电偶极禁阻跃迁, Ln^{3+} 本身对紫外光的吸收能力较弱,通常需要借助有机配体的“天线效应”实现能量的有效吸收与传递,从而敏化 Ln^{3+} 发光。金属有机框架(MOFs)是一类由金属离子或金属簇与有机配体通过配位作用构筑而成的多孔晶态材料。“MOF”这一术语最早由Omar Yaghi团队推广,他们揭示了该类材料在气体储存和分离领域的巨大潜力^[38-39]。Yaghi教授作为MOF领域的核心开创者,凭借他在有机框架材料领域的研究与系统性的发展,在2025年荣获了诺贝尔化学奖。作为全球科学界的最高荣誉,这也标志着MOF材料的

学术价值与应用潜力获得了广泛而权威的认可。自20世纪90年代问世以来,MOFs因结构可设计性强、组成灵活、功能丰富等特点而备受关注^[40-41]。据2025年报道,已收录于剑桥结构数据库(CSD)的实验MOF结构数量已超过126 800种^[42]。

镧系金属有机框架材料(*Ln*-MOFs)是由镧系离子与有机配体通过配位键构筑而成的一类有机-无机杂化多孔材料,其中 Ln^{3+} 通常作为高配位数(8~12)的节点,与含氧官能团(如—COOH、—OH)形成稳定配位结构^[43-47]。得益于有机配体种类、分子长度及共轭结构的可调性,*Ln*-MOFs可构建具有不同拓扑结构与孔道环境的多孔框架,从

而实现对发光中心微环境的精细调控(图1)。*Ln*-MOFs将MOFs的可调结构特性与 Ln^{3+} 窄带发射、高色纯度、长寿命及较高量子产率等优势相结合,为其在信息存储与防伪领域的应用奠定了重要基础^[48-50]。与镧系配合物的经典发光机理类似,*Ln*-MOF的发光过程通常遵循典型的“天线效应”机制,其能量传递步骤如下:配体首先吸收光能,使电子从基态跃迁至激发单重态(S_1);随后经由系间窜越(ISC)转移至最低三重态(T_1); T_1 中的能量再以非辐射方式传递至镧系离子的激发态(如 Eu^{3+} 的 3D_0 或 Tb^{3+} 的 5D_4),最终通过4f-4f跃迁产生特征发光(图2)^[51]。

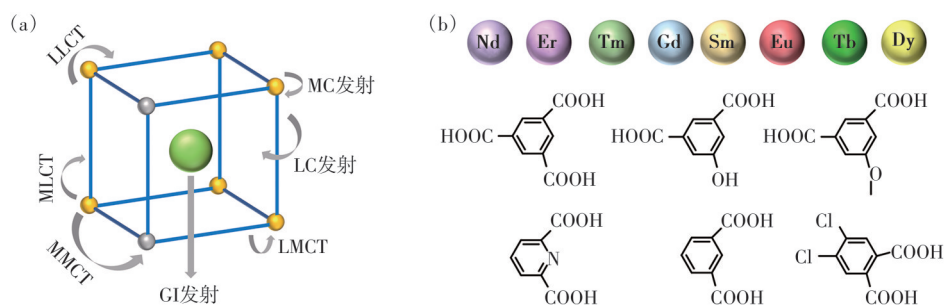


图1 (a)*Ln*-MOF中发射可能性示意图,其中,MC:金属中心发光,LC:配体中心发光,MLCT:金属-配体电荷转移,LMCT:配体-金属电荷转移,LLCT:配体-配体电荷转移,MMCT:金属-金属电荷转移,GI:客体诱导发射;(b)常见的 Ln^{3+} 以及有机配体^[34]

Fig.1 (a)Schematic illustration of the possible emission pathways in *Ln*-MOFs. MC: metal-centered emission; LC: ligand-centered emission; MLCT: metal-to-ligand charge transfer; LMCT: ligand-to-metal charge transfer; LLCT: ligand-to-ligand charge transfer; MMCT: metal-to-metal charge transfer; GI: guest-induced emission. (b)Representative Ln^{3+} ions and organic ligands^[34]

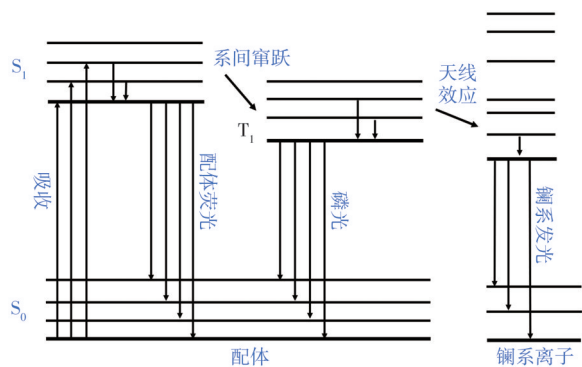


图2 镧系金属有机框架(*Ln*-MOFs)中光物理过程示意图^[51]

Fig.2 Schematic representation of photophysical processes in *Ln*-MOFs^[51]

然而,不同于镧系配合物,MOF的刚性骨架结构在能量传递过程中发挥着关键调控作用。一方面,刚性框架可有效限制配体振动并减少高能振动基团(如—OH、—NH)的非辐射弛豫,从而显著抑制猝灭过程并提高发光效率;另一方面,MOF的有

序结构有利于优化配体三重态能级与 Ln^{3+} 激发态之间的匹配关系,从而提升能量传递效率^[52]。此外,其多孔结构可通过限域效应调控客体分子或溶剂分子的进入与分布,进一步影响发光行为,实现对发光过程的动态调控。基于上述结构优势,*Ln*-MOFs在发光调控方面展现出区别于传统镧系配合物的独特特性。例如,通过调节配体结构、 Ln^{3+} 掺杂比例及主-客体相互作用,可在单一晶相中实现多色发光;同时,多刺激(光、热、pH等)响应行为可通过框架结构变化或客体分子调控实现,从而构建多维信息编码体系^[53]。这些特性使*Ln*-MOFs在复杂防伪体系中展现出更高的信息容量与安全等级,成为区别于传统发光材料的重要优势。

3 *Ln*-MOF在防伪中的应用类型

3.1 多模态发光 *Ln*-MOF

通过将具有不同发光特征的镧系离子引入

MOF 结构中,可构筑出具备特定发光功能的杂化材料^[54-55]。例如,用于红光发射的 Eu^{3+} 、绿光发射的 Tb^{3+} ,以及用于近红外发射的 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 离子^[56-58]。例如,Planas 团队^[59]采用高疏水性配体 $m\text{CBL1}$ (1,7-二(4-羧基苯基)-1,7-二碳杂-闭式-十二硼烷)与 Ln^{3+} 配位,设计并合成了一系列 MOF 材料($m\text{CB-Eu}_x\text{Tb}_{1-y}$)。新材料在水中和高温下均表现出优异的发光稳定性,同时展示出从绿到红的可调发射(图 3)。其发光机制依赖于 $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ 的高效能量传递,从而使量子产率显著提高。代表材料 $m\text{CB-Eu}_{0.1}\text{Tb}_{0.9}$ 的量子产率实现突破性提升,相较于

$m\text{CB-Eu}$ 的 20.5%,其量子产率达到 69.2%,增幅达 239%,同时发光寿命由 0.5 μs 提升至 10 000 μs 。基于以上综合性能,研究者展示了该材料在多模式防伪系统的应用潜力。Zhai 等^[60]提出了一种通过调控 Eu-MOF 的偏振发射来设计高容量光子条形码的简便方法。得益于材料高度各向异性的晶体结构和 Eu^{3+} 的低对称性能级分裂,其高偏振度(约 0.96)不仅实现了颜色可调发射,还产生了丰富且分辨率高的子条形码。这种晶体的偏振敏感发光特性为实现偏振隐形的子条形码提供了智能编码策略。

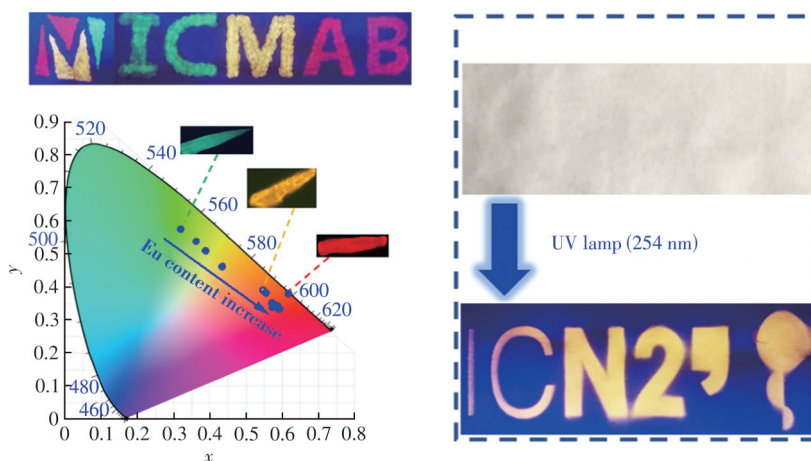


图 3 $m\text{CB-Eu}_x\text{Tb}_{1-y}$ MOF 材料的多色发光行为及防伪应用^[59]

Fig.3 Multicolor luminescence behavior of $m\text{CB-Eu}_x\text{Tb}_{1-y}$ MOF and its anti-counterfeiting application^[59]

近年来, Ln-MOFs 的上转换发光特性成为研究热点,其在光学防伪领域的应用也受到愈发广泛的关注。Sun 课题组^[61]报道了一种包含 Yb^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Tb^{3+} 和 Eu^{3+} 的二维 Ln-MOF (图 4(a))。通过多金属共掺杂策略并结合界面能量传递机制,该材料实现了双模式发光:在近红外(980 nm)激发下产生上转换红光发射(660 nm),在紫外光激发下产生下转换绿光和红光发射(545 nm 和 615 nm)。凭借其可调控的光响应行为,该体系能够在不同激发条件(NIR vs. UV)下选择性显现不同信息,实现多模式信息加密,从而显著提升编码信息的安全性及复杂度(图 4(b))。

Ln-MOFs 的发光效率仍有待提升,这直接制约了其实际应用。针对这一瓶颈,Sun 等^[13]提出了一种基于 Y^{3+} 与 Ca^{2+} 共掺杂 Eu-MOFs 的增强策略。其中, Y^{3+} 的引入能够促进能量传递并提高发光效率,而 Ca^{2+} 掺杂则有效调控 Eu^{3+} 中心周围的局部配位环境,减少非辐射损失,使发光强度提升至原来的 8 倍。该 Y/Ca 共掺杂 Eu-MOF 具有较高的稳定

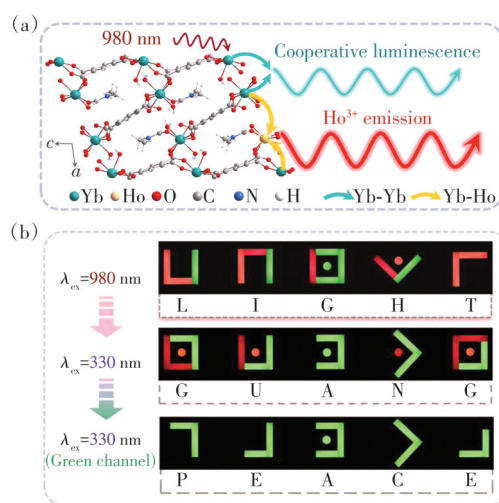


图 4 (a) Ho, Yb-PMA MOFs 的能量传递过程示意图;(b) 相应的防伪应用^[61]

Fig.4 (a) Schematic diagram of the energy transfer process in Ho, Yb-PMA MOFs , and (b) its corresponding anti-counterfeiting applications^[61]

性,并成功应用于光子条码和潜指纹检测。在另一项研究中,该研究团队构筑了以 Eu^{3+} 和 Tb^{3+} 为共

发射中心、Yb³⁺为近红外敏化剂的多模发射 Ln-MOFs^[62]。Yb³⁺的引入显著增强了近红外吸收和能量传递效率,使材料发光强度提高了8倍。1,3,5-苯三甲酸(BTC)作为高效配体,提供了刚性骨架及

适宜的配体到金属能量传递能级,从而进一步提升光学性能。多模发射特性赋予 Ln-MOFs 在信息加密和防伪应用中的巨大潜力(图5)。此外,该团队还报道了多种其他新型 Ln-MOF 材料^[63-64]。

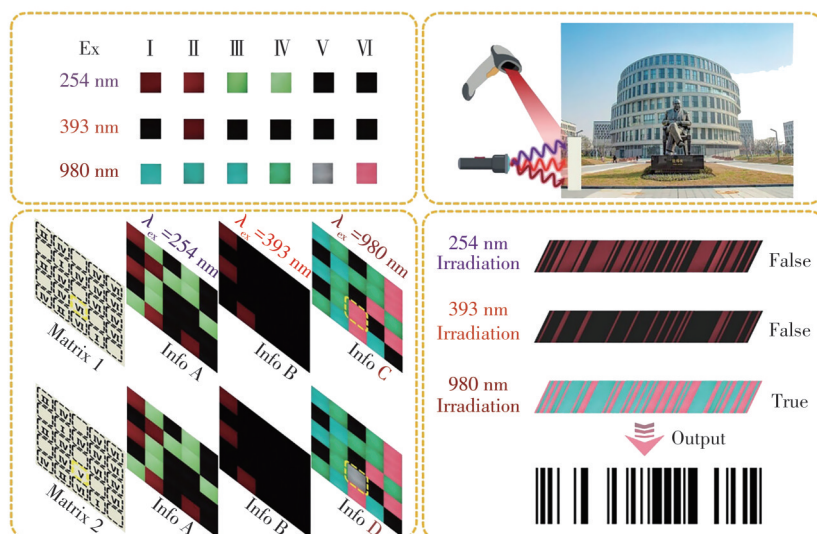


图5 不同光照下多种MOFs的发光照片及其对应的多信息防伪能力展示图^[62]

Fig.5 Multimodal information anti-counterfeiting achieved by luminescent MOFs, as demonstrated under different illumination conditions^[62]

为进一步构筑多模态发光体系,Song等^[65]将三线态-三线态湮灭上转换(TTA-UC)材料与掺杂 Ln³⁺的长余辉磷光材料结合,构建了一种拥有四种独立发射模式的发光体系。相应的多维防伪图案通过直写法制备。同时,由聚 α -蒎烯与聚异丁烯构成的双聚合物网络基体被用于保护 TTA-UC 材料免受氧猝灭,并提升体系的可打印性。将荧光碳点(CDs)与 Ln-MOFs 结合同样在多维防伪纳米复合材料的构筑方面展现出巨大潜力。例如,Jia课题组^[66]将绿色荧光碳点和红色荧光 Eu-MOFs 共同负载于氨基黏土上,制备了一种刺激响应型智能发光材料(AC@CDs-Eu-MOFs)。该复合材料在光刺激和化学刺激下展示出可调的荧光特性,进一步设计出易于识别但难以复制的五维防伪条形码。该五维防伪条码具有信息容量大、成本低、认证简便等优势,在光学数据存储与多维信息加密领域展现出巨大潜力。此外,该材料的化学刺激响应特性使其能实现对 Cu²⁺ 和炭疽芽孢杆菌的检测。特别是对于环境水样中的 Cu²⁺,可实现低至 10.67 nmol/L 的定量检测限,证明了该材料在环境污染物检测方面的应用前景。

综上所述,多模态发光 Ln-MOFs 的构建主要依赖于多组分协同调控策略,包括多 Ln³⁺ 的共掺

杂、能量转移路径设计以及与功能材料(如碳点、上转换体系等)的复合。这类体系可在单一平台中实现多通道发光输出,从而显著提升信息编码维度与防伪复杂度。然而,多模态体系在实际应用中仍面临组分间相互干扰、动态性能不足等挑战。而基于外界刺激触发的响应型 Ln-MOFs 则可实现信息的动态调控,其中酸碱响应作为最常见且易实现的一类刺激方式,在智能防伪体系中具有重要应用价值。

3.2 酸碱响应 Ln-MOF

酸碱刺激响应发光材料能够依据环境 pH 值或酸碱物质的存在,改变其发光特性(如强度、发射颜色或寿命)。这种对 pH 变化的高敏感性,使该类材料在防伪、传感器、生物成像及智能标签等领域展现出重要应用价值。对于镧系材料而言,pH 变化常通过改变配位环境、配体构象或能量传递过程来调控发光行为^[67]。Yan 等^[68]设计并制备了一种双响应型 Eu³⁺ 功能化 MOF 发光薄膜(1@SA),该薄膜通过将均匀分散的锌基 MOF 与 Eu³⁺ 离子及海藻酸钠水凝胶交联而成。Zn-MOF 中存在的未配位羧基为 Eu³⁺ 提供了结合位点,海藻酸钠的引入则赋予薄膜优异的柔韧性和可加工性。该传感薄膜在酸性环境中表现出独特的荧光

变化,在防伪技术中具有良好应用前景。这种 pH 依赖的发光行为可归因于酸性条件下 Zn-MOF 骨架中未配位羧基的质子化,从而破坏了 Eu^{3+} 与 MOF 基质间的配位相互作用,降低了配体向 Eu^{3+} 的能量传递效率,最终引起发光强度下降与明显的颜色变化,形成适用于 pH 响应型防伪应用的可逆荧光响应。Liu 等^[69]通过水热法合成

了两种基于 CB[8] 的新型铜系金属-有机框架材料,并简单标记为 1 和 2。其中,代表样品 1 在宽 pH 范围的水溶液中表现出显著稳定性,并可通过荧光猝灭效应对左氧氟沙星进行选择性检测,检测限为 $0.10 \mu\text{mol/L}$ 。此外,借助该复合体系对 pH 的响应特性,构建了一种新型 pH 响应型信息加密防伪平台(图 6)。

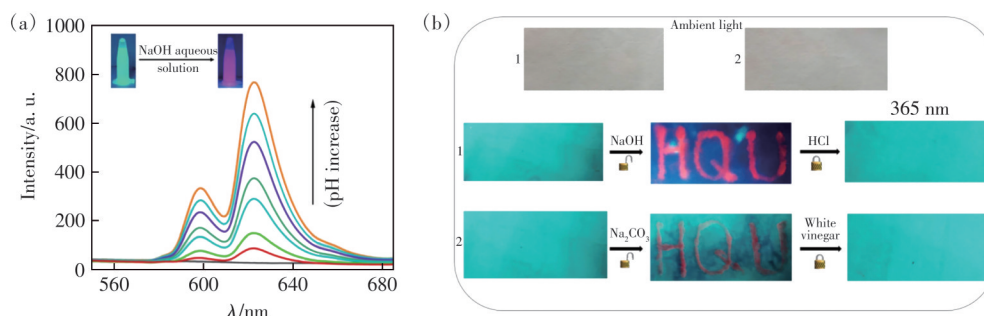


图 6 (a)混合体系随 pH 变化的荧光发射光谱(插图:酸/碱刺激下的荧光颜色切换);(b)在滤纸上利用酸/碱性溶液书写“HQU”字样,于日光下以及 365 nm 紫外灯下的显示效果^[69]

Fig.6 (a)pH-dependent emission spectra of the mixed system (inset: fluorescence color switching upon acid/base stimulation). (b)The pattern “HQU” written on filter paper using acidic/alkaline solutions, as observed under daylight and a 365 nm UV lamp^[69]

综上所述,酸碱响应 Ln-MOFs 的发光调控主要依赖于外界 pH 变化引起的配位环境改变、配体质子化/去质子化以及能量传递路径调节等机制。从应用角度来看,酸碱响应体系具有操作简便、无需复杂外部设备等优点,适用于一次性或低成本防伪场景。然而,其响应过程通常依赖直接接触化学试剂,在隐蔽性与远程操控方面存在一定局限。相比之下,光响应作为一种非接触式刺激方式,可实现更高空间分辨率与远程可控性。

3.3 光响应 Ln-MOF

光辐射是一种环保的刺激方式,具有非侵入性、非破坏性,并且其能量、时长与波长可精确调控^[70-71]。它提供亚微米至微米级的聚焦能力,并能实现远程与定向操控^[72-73]。光响应型 Ln-MOFs

通常可通过两种途径获得:一是引入含光响应基团的配体参与配位构筑框架,二是将光响应分子作为客体引入 Ln-MOF 体系,从而赋予材料光响应性能^[74]。本团队通过将光可逆的二芳基乙烯嵌入具有强红色荧光的 Eu^{3+} 基 Ln-MOF (ZJU-88) 中,开发出一种新型防伪材料^[75]。紫外光诱导的开环与闭环异构化可精确控制荧光共振能量转移过程,从而实现荧光的可逆开关。在 365 nm 紫外光下,隐藏图案显现;而 300 nm 紫外光则将其“擦除”,且该状态可稳定保持数月而不自发恢复。可见光($>450 \text{ nm}$)能使红色荧光恢复,完成解密过程(图 7)。这一远程、光触发的信息存储系统兼具长期隐蔽性、可重复性和环境友好性,为先进防伪应用提供了巨大潜力。

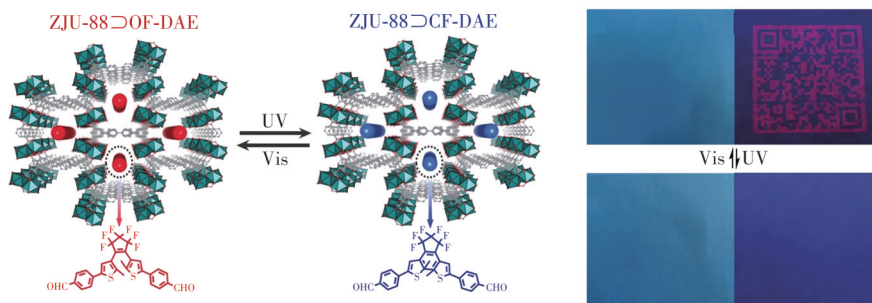


图 7 光敏 ZJU-88OF-DAE 材料的响应机理及其防伪应用^[75]

Fig.7 Response mechanism of ZJU-88OF-DAE material and its anti-counterfeiting application^[75]

螺吡喃(SP)及其衍生物因其光致异构化行为而被广泛认知。在紫外光照射下,无荧光的闭环异构体可逆转变为具有荧光的开环部花青异构体(MC),后者在可见光下可恢复原状。基于此,Yang及其团队^[76]报道了一种通过预处理Ln-MOF增强SP光致变色性能的方法。研究者采用甲醇活化与330℃高温煅烧,成功地将MOF的孔径从2.06 nm扩大至4.23 nm,显著提升了SP的负载能力与光响应效率。通过荧光共振能量转移机制

(FRET),该复合材料在紫外照射下呈现出从黄色到紫色的物理颜色变化,以及从黄色到红色的荧光开关。基于这一特性,该团队制备了高对比度图案,利用可逆光致变色行为实现了信息存储与高级防伪(图8)。类似地,该团队在另一项工作中^[77],通过控制螺吡喃单元的异构化,实现了螺吡喃受体与镧系供体间FRET机制的调控,使材料具备优异的可逆吸收与发射可调性,对高级安全技术中的时间敏感性加密与解密具有重要意义。

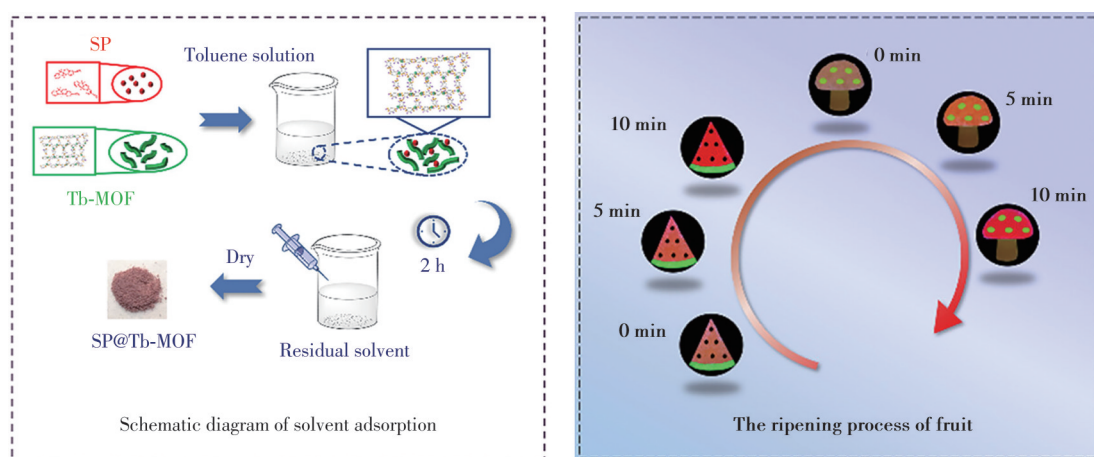


图8 基于SP和Ln-MOF的光致变色发光材料的制备流程及防伪应用^[76]

Fig.8 The preparation process and anti-counterfeiting application of photochromic luminescent materials based on SP and Ln-MOF^[76]

近几年,能够在不同刺激下产生多重显著光学输出的智能响应材料为构建多层次安全机制提供了良好平台。Xu等^[78]报道了一种智能多响应的MOF-on-MOF材料:以一种MOF(HPU-14)为基底在外层生长ZIF-8,并将不同的发光中心如蒽(ANT)和Ln³⁺分别限制在两个MOF中。由于ZIF-8孔道中存在ANT,该复合材料在365 nm紫外光照射下可表现出可逆的光开关行为,从而实现“复位与重复使用”的动态防伪应用。同时,当经酸/碱气体处理后,该材料在254 nm紫外照射下也能表现出可逆的开关行为,为设计多层次防伪材料开辟了新途径。

综上所述,光响应Ln-MOFs体系通常具有良好的可逆性与较高的对比度,适用于信息的反复写入与擦除;FRET调控体系在响应灵敏度与调控精度方面表现突出;而多组分体系则更适合构建多层次、高容量的信息加密平台。从应用角度来看,光响应Ln-MOFs凭借其非接触、远程操控及高空间分辨率等优势,在动态防伪与信息存储领域具有明显优势。然而,该类体系仍面临光疲劳

效应、响应效率受限及对特定波长光源依赖等问题,有待进一步优化。

3.4 热响应Ln-MOF

热敏性镧系金属有机框架是一类能响应温度变化、实现可逆或不可逆发光调控的智能材料^[79]。该类材料通常通过将Ln³⁺与β-二酮、含氮杂环或羧酸等热敏性有机配体配位构筑而成,其发光行为源于温度依赖的能量转移、分子构象调整或晶相转变^[80]。设计该类材料的关键在于合理选择配体及采用多金属共掺策略,以实现荧光颜色或强度的动态温控调节,并可通过MOF结构的热致相变或客体分子的吸附/脱附进一步提升热响应灵敏度。相较于传统防伪材料,热敏性Ln-MOFs具备多项显著优势:其高色纯度和长荧光寿命赋予优异的光学性能,在环境条件下结构稳定,温度恢复时可实现可逆切换,并能与机械、光或湿度响应机制无缝集成。

为了进一步提升防伪水平,Deun及其同事^[81]通过将混合镧系β-二酮配合物嵌入金属有机框架的纳米孔道中,构建了一种新颖的“仿变色龙式”多级

防伪材料体系,实现了独特的波长与温度依赖性发光特性(图 9(a))。该团队采用选择性配位策略,促使 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Sm^{3+} 与 β -二酮配体自组装,赋予材料强烈且可调的荧光发射。在紫外激发下,该材料展现出双重防伪能力:既可通过荧光颜色进行认证,又能在接近室温的狭窄温度区间内表现出高度可逆的绿-红颜色转变。这种热敏发光调控显著增强了加密的复杂性与可靠性(图 9(b))。防伪信息可在紫外光下显现,并通过温度调制进一步加密,使该材料适用于先进的多级信息存储

与动态光学加密。值得注意的是,MOF 孔道有效保护了镧系配合物免受环境猝灭与降解,显著提升了材料的稳定性与长期使用性能。Qiu 团队^[82]通过将双镧系离子掺杂到压电颗粒中,实现了多色、双时间尺度及四模式(热/机械驱动和上转换/下移)响应的发光特性,成功构建了多维防伪编码体系。该材料可集成于聚合物薄膜中,制成防水、柔性、可穿戴且高拉伸的器件,其防伪信息可通过智能手机 LED、书写笔、温度变化及紫外/近红外光源等常用工具读取。

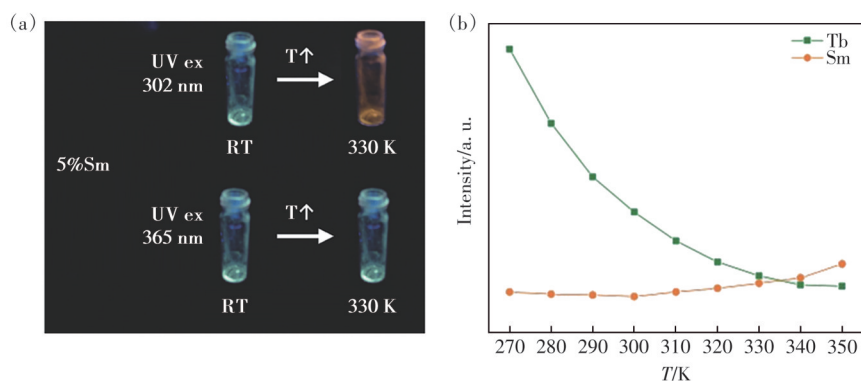


图 9 (a) 5%Sm, 95%Tb-@MOF253_tfac 在 302 nm、365 nm 激发下的温度依赖发光行为; (b) 302 nm 激发下 $\text{Tb}^{3+} (^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5)$ 、 $\text{Sm}^{3+} (^5\text{G}_{5/2} \rightarrow ^6\text{H}_{9/2})$ 跃迁的发射强度随温度的变化^[81]

Fig.9 (a) Temperature-dependent luminescence of 5%Sm, 95%Tb-@MOF253_tfac under 302 nm and 365 nm excitation. (b) Variation in emission intensity for the transitions of $\text{Tb}^{3+} (^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5)$ and $\text{Sm}^{3+} (^5\text{G}_{5/2} \rightarrow ^6\text{H}_{9/2})$ with temperature upon 302 nm excitation^[81]

开发多空间响应型分段发光异质结构体系对实现防伪微型化光子条形码具有重要意义。然而,在微纳米尺度上动态调控空间色彩仍是一项艰巨的挑战。Gao 等^[83]提出一种通过放大柔性 Ln-MOFs 中构象驱动响应来构建空间异质结构的策略。在该策略中,有机供体的热诱导微小构象变化可显著调控 Ln 受体的光致发光性能。基于同构型 Ln-MOF 结构的优势,通过多个响应性 MOF 单元的外延生长,成功构建了成分与结构各异的异质结构。这些受温度调控的发射色彩具有可分辨的光谱特征,承载着特定异质结构的指纹信息,从而能够有效构建具有空间响应特性的智能光子条形码。该研究深化了对构象驱动响应机制的理解,并为制备复杂刺激响应分级微结构标签提供了理论指导。

此外,开发能够响应多重刺激、实现固态多色光致发光切换的智能 Ln-MOF 材料,对先进防伪技术具有重要意义。Zhou 等^[84]报道了一种三元 MOF 杂化材料,可在固态下实现对湿度、光和温度响应的多色发光切换(图 10(a))。该材料通过阳离子交换法

将 Eu^{3+} 和甲基紫精(MV)共同封装于阴离子 MOF 骨架中,客体阳离子在框架通道内有序排列,借助分子间耦合作用协同实现了多重刺激响应的发光颜色切换。该材料在水刺激下可发生快速可逆的红-蓝发光转变,而通过光或热刺激实现红-暗发光转变(图 10(b))。基于这些特性,研究采用新型三重加密策略设计并制备了发光莫尔斯码图案,展示了该杂化材料在高端防伪领域的广阔应用前景。

分子转子是一种分子结构,其构象可以受到温度或光等外界刺激而改变,其动态行为可以影响材料的光电性能。以往的研究主要集中在分子转子在光驱动开关或分子马达中的应用,而将这些系统与 Ln-MOF 相结合进行动态发光调节的研究很少。在一项开创性的研究中,Zhu 等^[85]构建了一种基于镧系元素的智能发光 MOF,该 MOF 包含具有自适应天线效应的动态分子转子。研究人员利用错位和反平行的分子转子配体 4,4,4'-三苯胺三羧酸酯(TPA-COOH)和单核二级构建单元合成了在强酸性和碱性水溶液中保持稳定的层状 Ln-

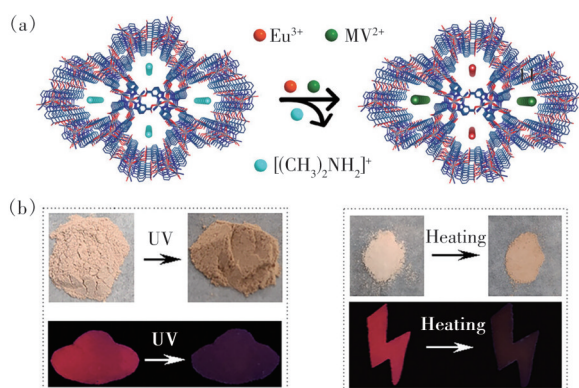


图10 (a)通过阳离子交换封装 Eu^{3+} 和 MV 阳离子示意图; (b) $\text{Eu}/\text{MV}@1$ 在日光和 365 nm 紫外光照射及热处理前后的照片^[84]

Fig.10 (a) Schematic diagram of the encapsulation of Eu^{3+} and MV cations through cation exchange. (b) Photographs of $\text{Eu}/\text{MV}@1$ before and after exposure to sunlight and 365 nm ultraviolet light and heat treatment^[84]

MOF。通过调节温度,他们调节 TPA-COOH 转子的运动或扭转程度,从而调节天线效应以匹配不同的镧系离子(Tb^{3+} 或 Eu^{3+}),实现多色发光切换(图 11)。该研究首次成功构建了具有自适应天线效应的智能 Ln -MOF,不仅可以精确调节能量转移途径,实现智能发射开关、上转换发光和多级防伪,还阐明了 TPA-COOH 配体与 Ln^{3+} 之间的电子转移机制,为理解镧系发光材料的光物理行为提供了一个新的视角。

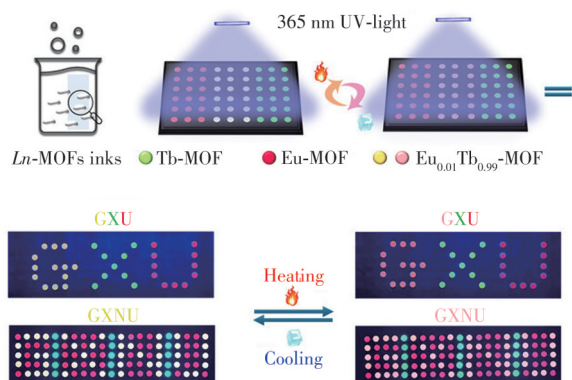


图11 “GXU”和“GXNU”图案在 365 nm 紫外光下和加热后的发光变化^[85]

Fig.11 Luminescence changes of the “GXU” and “GXNU” patterns under 365 nm ultraviolet light and after heating^[85]

综上所述,热响应 Ln -MOFs 的发光调控机制主要可归纳为三类:一是基于温度依赖的能量传递过程调控,通过改变配体三重态能级与 Ln^{3+} 激

发态之间的匹配关系,实现发光强度或颜色的调节;二是依赖分子构象变化或分子转子运动,通过调控“天线效应”效率实现动态发光切换;三是基于 MOF 骨架或客体分子的热致相变与吸附/脱附行为,实现发光状态的可逆或不可逆转变。这些不同机制在响应特性上各具优势,其中能量传递调控体系通常具有较高的响应灵敏度,而构象驱动体系在多色可调与精细调控方面表现突出,基于相变或主-客体作用的体系则更适用于信息存储与不可逆加密等场景。与光响应体系相比,热响应 Ln -MOFs 无需外部光源即可触发响应,在隐蔽性与实际操作便捷性方面具有一定优势,但其响应精度与空间分辨率相对受限。同时,该类材料仍面临响应温区较窄、循环稳定性不足及环境干扰等问题,有待通过结构设计与多组分调控进一步优化。

3.5 多重响应 Ln -MOF

近年来,开发具有“多重响应模式”和“多色发光中心”的材料,利用复杂的、难以复制的光信号变化来编码信息成为科研人员关注的焦点。例如,Zhang 等^[86]报道了一种基于双发射复合材料的智能防伪与传感平台,通过将蓝色荧光氮硫共掺杂碳点封装于红色荧光 Eu -MOF 的孔道中,成功构建了具有多重刺激响应特性的复合材料。其防伪机制融合了酸碱与溶剂双重响应逻辑:MOF 主体可通过质子化/去质子化过程实现对 Eu^{3+} 红色荧光的可逆开关,而封装碳点的发光则在水分子渗透时被选择性激活。基于此,研究者设计出由两种功能墨水构成的动态防伪系统,在酸碱蒸汽刺激下可呈现“红-蓝-无”的颜色循环与信息切换,实现了高复杂度的可逆信息加密(图 12)。同时,该复合材料在不同溶剂中表现出显著的荧光比率变化,可进一步作为高灵敏度、可视化的水分传感器。该工作展示了如何通过主客体工程精准调控发光行为,将单一材料体系拓展至多重防伪与传感应用,为开发新一代智能光学材料提供了重要思路。

Wang 等^[87]提出了一种双刺激响应的 Tb/Eu -MOF 薄膜,该薄膜在热/湿刺激下, H_2O 配体的损失/增加驱动了不同离子距离的两相之间的可逆相变。加热有利于 Tb^{3+} 向 Eu^{3+} 的能量转移,导致发射颜色由绿色变为红色。湿度带来的相反影响使发射色变回绿色。该研究表明,通过合理设计

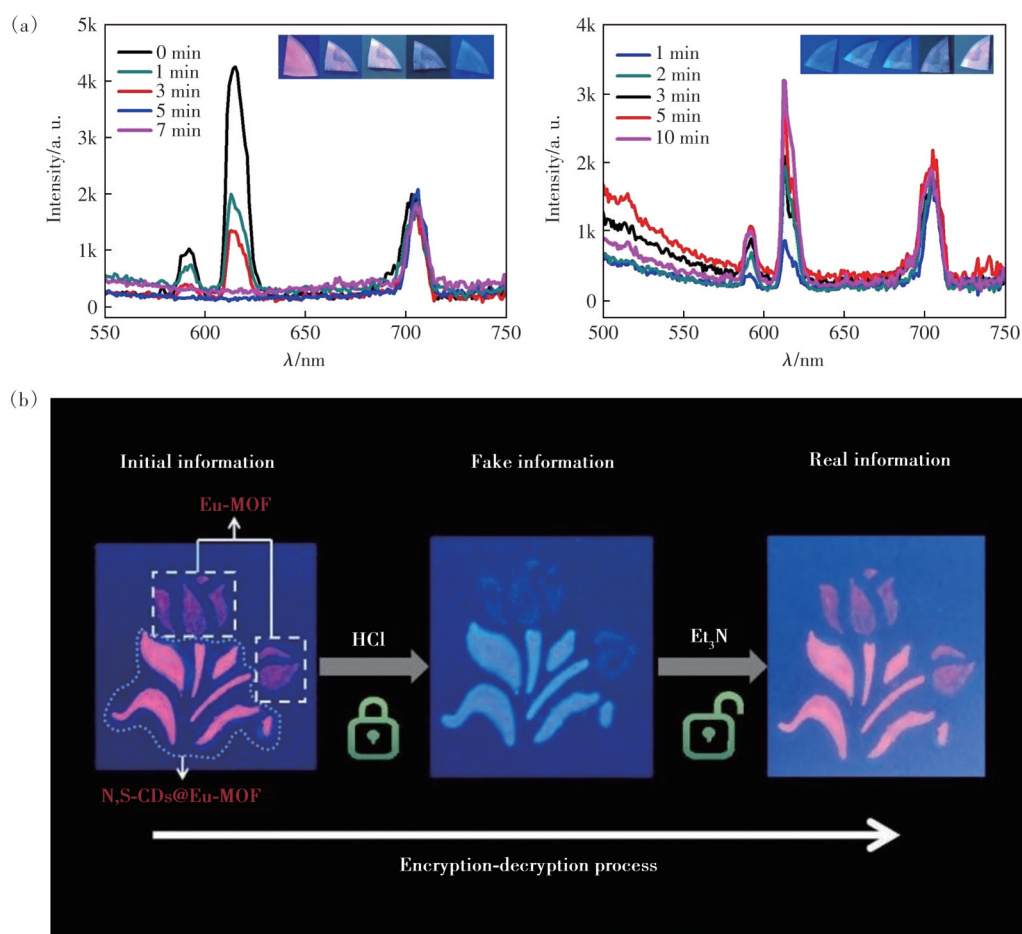


图 12 (a)Eu-MOF 复合薄膜在 HCl 蒸汽(左侧)或三乙胺蒸汽(右侧)刺激不同时间后的发射光谱及发光颜色变化照片;
(b)基于 Eu-MOF 和 N,S-CDs@Eu-MOF 的防伪平台示意图^[86]

Fig.12 (a)Emission spectra and luminescence color change photographs of the Eu-MOF composite film after stimulation with HCl vapor (left) or triethylamine vapor (right) for different durations. (b)Schematic diagram of the anti-counterfeiting platform based on Eu-MOF and N,S-CDs@Eu-MOF^[86]

MOF 结构和调控外界刺激,可以有效地控制 Ln -MOF 薄膜的颜色响应,从而实现高安全性防伪应用(图 13)。进一步地,该团队在 Ln -MOF 中引入了一种由“歧化”化学过程驱动的、具有阈值特性的突跃式热致变色行为^[88]。它不再仅仅是“热调光”,而是“热触发化学重构并改色”。这为开发下一代具有数字化响应特征、可用于超高安全性防伪发光材料开辟了全新的设计思路。此外, Li 等将 Gd^{3+} 引入 Ln -MOFs 结构中,用以调节 Ln^{3+} 间的距离。当 Gd^{3+} 稀释率固定为 50% 时, Tb^{3+} 和 Eu^{3+} 的发射强度达到最大值。该材料表现出温度依赖性发光,即使在超低温条件下仍具有热稳定性。此外,样品还表现出水敏特性,其发光可通过水雾化作用猝灭。进一步结合喷墨印刷技术及水猝灭效应,加密信息可依次通过紫外照射与水雾化处理实现解密。

综上所述,多重刺激响应 Ln -MOFs 通过整合不同外场(如光、热、pH、湿度等)对发光行为的协同调控,实现了由“单一响应”向“多维信息编码”的跨越。这些策略显著提升了信息加密的复杂度与不可复制性。从防伪应用角度来看,多重响应 Ln -MOFs 能够构建多维信息编码体系,例如结合颜色、强度、寿命及响应顺序等参数,实现多维度协同加密,大幅提高防伪体系的安全等级。然而,该类体系在结构设计与性能优化方面仍面临挑战,例如多响应单元之间的相互干扰、响应条件的精确匹配以及体系稳定性与可重复性等问题。未来需从分子设计、界面调控及多组分协同机制等方面进一步深入研究。

3.6 多材料集成 Ln -MOF

在面向实际应用时,将功能性 Ln -MOF 与柔性基质、纸基、纤维或水凝胶相结合,是突破其

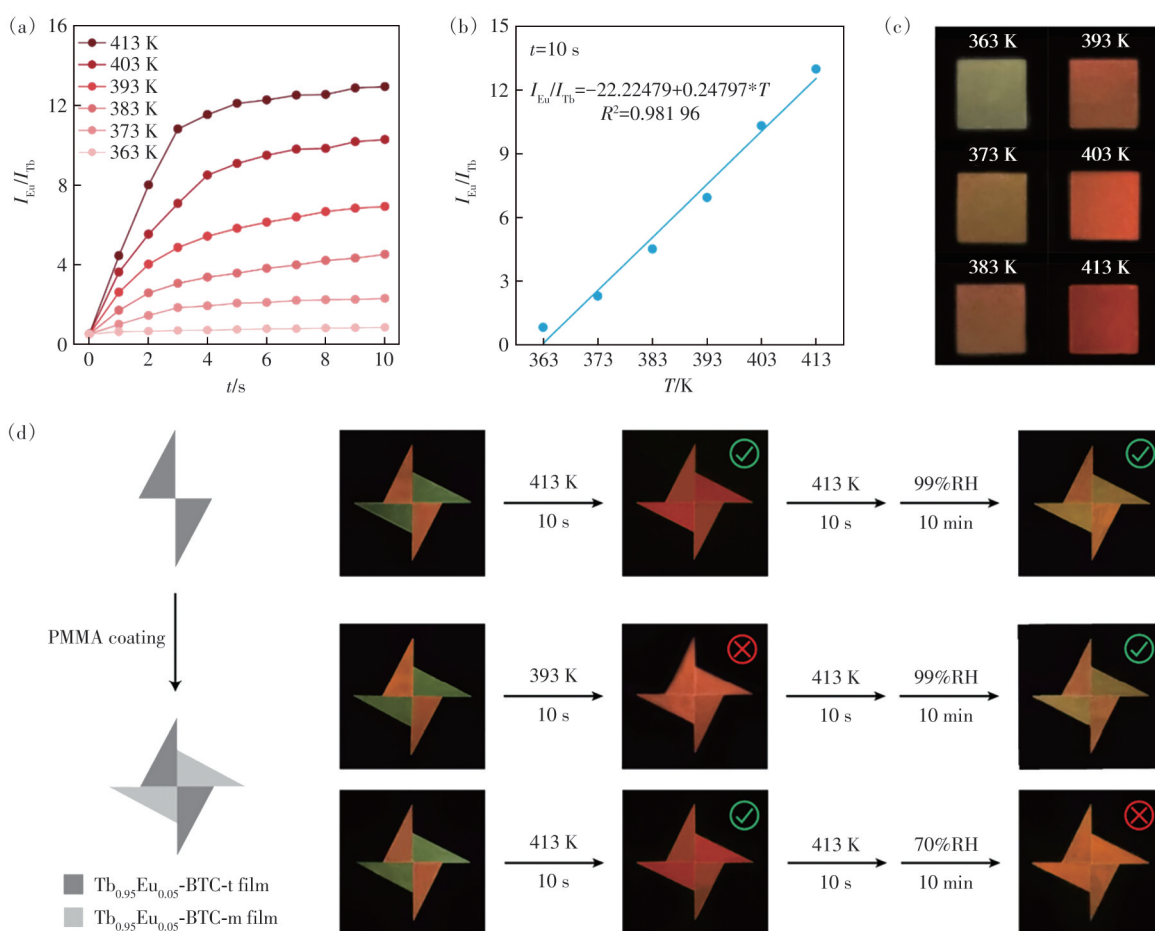


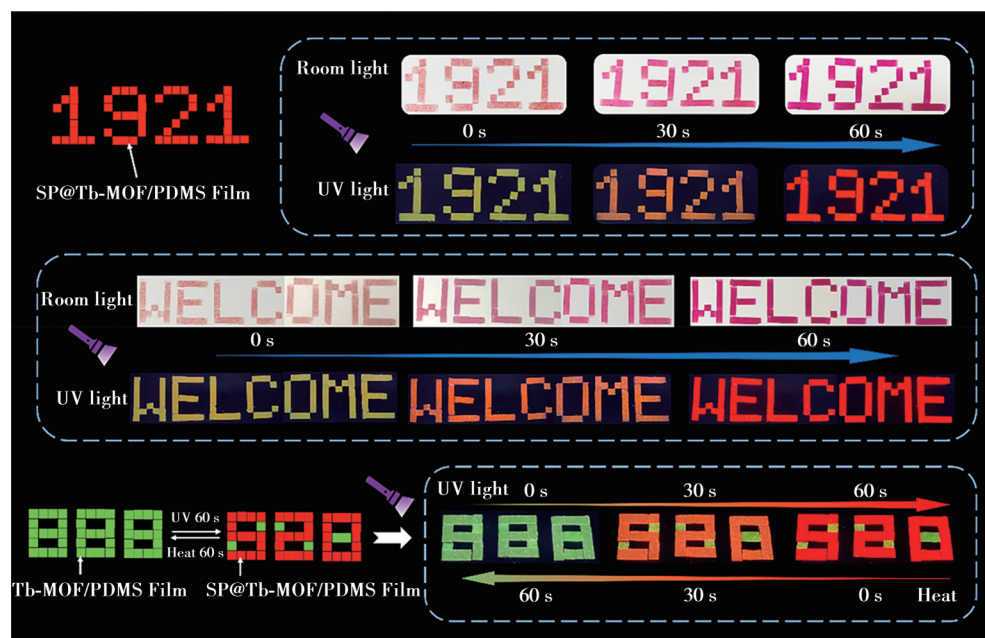
图 13 (a) $Tb_{0.95}Eu_{0.05}$ -BTC-m 薄膜在不同温度下, I_{Eu}/I_{Tb} 随加热时间的变化关系; $Tb_{0.95}Eu_{0.05}$ -BTC-m 薄膜在不同温度下加热 10 s 后, 在 254 nm 紫外光激发下的 (b) I_{Eu}/I_{Tb} 比值及 (c) 发光照片; (d) 防伪平台应用^[87]

Fig.13 (a) Variation of I_{Eu}/I_{Tb} for the $Tb_{0.95}Eu_{0.05}$ -BTC-m film as a function of heating time at different temperatures. (b) I_{Eu}/I_{Tb} ratios and (c) luminescence photographs of the $Tb_{0.95}Eu_{0.05}$ -BTC-m film at different temperatures after heating for 10 s under 254 nm UV-light excitation. (d) Anti-counterfeiting platform application^[87]

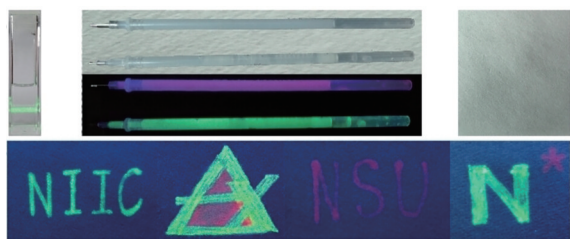
本征脆性、实现实用化与高性能化的有效途径。以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为例(图 14), 其优异的弹性、透明性和化学惰性, 不仅为 Ln -MOF 提供了柔性可拉伸的载体与物理保护层, 显著提升了复合材料的环境稳定性和机械耐久性, 更借助 PDMS 良好的加工性实现了材料的复杂图案化与器件集成^[77]。为进一步实现从宏观结构到微观功能的一体化设计与制造, 研究者将目光投向了更具空间自由度的 3D 打印技术^[89]。与直接将 MOF 作为打印油墨的复杂工艺不同, 一种基于“打印后处理”的策略被成功开发。该方法首先打印出含有有机配体的三维结构基底, 随后将其浸入镧系离子溶液中, 通过离子与配体间的配位与螯合作用, 在打印结构表面原位、快速地生长出 Ln -MOF 晶体。这一过程不仅实现了亚毫米级的空间分辨率和高形状保真度, 赋予了宏观组装体可调控的

荧光特性, 更关键在于它打通了“数字模型设计—三维结构成型—智能功能赋予”的全链条。

水凝胶以其可调的刺激响应性、出色的柔韧性及生物相容性成为当前材料学的研究前沿^[90-91]。将具有独特发光性能的 Ln -MOF 与水凝胶复合, 构筑兼具动态光学调制能力与机械适应性的新型防伪材料, 已成为该领域备受关注的研究方向。Fedin 等^[92]通过溶剂热反应, 使 5,5'-(吡啶-2,6-二基双氧)二间苯二甲酸(H_4L)与硝酸铕(Ⅲ)或硝酸铽(Ⅲ)反应, 生成了同构的二维配位聚合物 $[Ln(HL)(H_2O)_3]_n$ (NIIC-1-Eu 与 NIIC-1-Tb)。其层状结构由八配位的 Ln^{3+} 通过三重去质子化的配体 HL^{3-} 连接而成。其中, NIIC-1-Tb 通过荧光猝灭效应表现出优异的传感性能, 对 Fe^{3+} (检测限 8.62 nmol/L)、抗生素氧氟沙星(OFX, 检测限 3.91 nmol/L)以及棉酚(检测限 2.27 nmol/L)均具有极低的检测

图 14 基于 SP@Tb-MOF/PDMS 薄膜的刺激-响应防伪应用^[89]Fig.14 Stimulus-response anti-counterfeiting application based on SP@Tb-MOF/PDMS film^[89]

限。NiIC-1-Tb 的光致发光量子产率高达 93%, 展现出高效的光致发光, 其发光颜色可通过激发波长和发射监测的时间延迟进行调控。基于 NiIC-1-*Ln* 独特且可调的发光行为, 设计了一种原创的防伪平台(图 15)。此外, Yan 等^[93]通过简易合成制备了一种 Tb³⁺ 功能化 Eu-MOF 杂化双网络水凝胶薄膜(Tb@Eu-MOF@PVA/SA)。该水凝胶通过 Tb³⁺ 交联及冻融循环获得了良好的机械性能。该水凝胶薄膜中 Eu-MOF 表面的游离羧基能与 Tb³⁺ 结合, 从而形成具有双发射中心的荧光水凝胶薄膜。通过测试两类检测器并调控不同激发波长, 可实现信息的加密与解密, 构建防伪平台以提升信息安全水平。

图 15 基于 NiIC-1-Eu 防伪应用展示^[92]Fig.15 Anti-counterfeiting application based on NiIC-1-Eu^[92]

近年来, 钙钛矿纳米晶体因其优异的发光性能与可调光学特性, 在材料科学与光电领域引起了广泛关注。Xia 等^[94]将发光钙钛矿纳米晶体与 *Ln*-MOFs 相结合, 提出了一种高科技防伪解决方案。通过将钙钛矿 CH₃NH₃PbBr₃ 纳米晶体封装于

Eu-MOFs 中, 成功制备出具有多级防伪行为的杂化材料(CH₃NH₃PbBr₃@Eu-MOF)。该杂化材料在粉末或薄膜形态下均表现出激发波长与温度依赖的发光特性。此外, 通过水浸处理与 CH₃NH₃Br 转化过程, 可实现 CH₃NH₃PbBr₃@Eu-MOF 复合材料光致发光猝灭与恢复, 展现出在防伪领域的应用潜力。该研究成果为制备具有可控发光性能的杂化材料开辟了新途径。

尽管近年来 *Ln*-MOF 基多材料集成体系取得了显著进展, 但仍面临若干共性科学问题。首先, 不同材料之间的界面相容性仍是限制其性能稳定性的关键因素, 尤其是在 MOF 与高分子基体(如 PDMS、水凝胶)复合过程中, 界面缺陷可能导致发光效率下降或响应行为衰减^[95]。其次, 多材料体系在长期使用过程中的结构稳定性与循环响应稳定性仍需提升, 特别是在光、热及化学刺激反复作用下的性能保持能力。再次, 如何在保持 *Ln*-MOF 发光特性的同时, 实现其在柔性基底上的均匀分散与可控排列, 是实现高分辨率信息编码的关键^[96]。未来研究可从界面工程调控、结构封装策略及多尺度组装方法等方面入手, 以提升 *Ln*-MOF 基复合体系在实际防伪应用中的可靠性与可扩展性^[97-98]。

4 总结与展望

本文综述了 *Ln*-MOFs 在防伪领域的研究进

展,并重点讨论了其可控发光性质与刺激响应行为,以及相应的先进防伪平台设计策略。相较于传统防伪材料,智能型 *Ln*-MOFs 展现出优异的光学性能与动态响应能力,可实现多层次信息输出,显著提升了防伪的复杂性与安全性。然而,要实现其大规模应用,仍面临若干关键挑战。为进一步推动该领域发展,未来研究应重点关注以下方向。

(1) 可靠性与实用性提升

当前,部分 *Ln*-MOFs 在长期使用中仍面临光漂白、热降解及湿气诱导猝灭等问题,且存在合成工艺复杂、与现有印刷涂覆技术兼容性差等局限^[99-100]。未来应着力从配体设计、配位环境调控及复合体系构建等方面入手,提升材料的量子产率、环境稳定性与加工性能。同时,探索在保证性能的前提下降低昂贵试剂的用量,实现降本增效^[101-102]。并且应重视发展用户导向的认证方式,如利用日光、体温或呼出湿气等日常条件触发颜色或发光变化,减少对专业仪器的依赖,提升实际应用便利性。

(2) 智能响应与器件集成

Ln-MOFs 与柔性基底(如形状记忆聚合物、多功能水凝胶以及有机凝胶等)的深度结合尚处于起步阶段^[103]。未来可通过界面工程与结构调控等策略,增强 *Ln*-MOFs 与柔性基底之间的协同作用,实现材料高稳定性与高性能兼顾。此外,结合先进加工技术(如3D打印与微纳制造),推动 *Ln*-MOF 基防伪材料向器件化与实际应用转化至关重要^[104]。

(3) 规模化与可持续发展

当前,发光 *Ln*-MOFs 体系多依赖 Tb³⁺ 与 Tb³⁺ 等典型发光中心,稀土资源成本较高且利用效率有待提升,这在一定程度上制约了其大规模应用^[105]。未来应从材料设计源头出发,发展低稀土含量或替代体系,并优化合成工艺与资源利用效率。同时,构建可循环、环境友好的材料体系,对于实现 *Ln*-MOFs 防伪材料的可持续发展具有重要意义^[106]。

(4) 信息存储与调控维度

值得注意的是,尽管 MOF 材料以其高度有序的多孔结构著称,但当前 *Ln*-MOF 在防伪领域的研究多集中于发光中心及配体调控,对孔道结构的功能化利用仍较为有限^[107]。未来可通过引入功能性客体分子、构建多组分主-客体体系等策略,将 MOF 孔道转化为信息调控与存储单元,从而实现更高维度的防伪编码与动态加密。

总之,*Ln*-MOF 基防伪材料正朝着更高效率、更优稳定性、更多维响应及更好加工性能的方向快速发展。通过持续的材料设计创新、跨学科协作以及以用户为中心的工程化努力,*Ln*-MOFs 有望在未来为信息安全、产品真伪鉴别及智能包装等领域提供更安全、更智能、更可持续的解决方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.3724/CJL.20260064>

参 考 文 献:

- [1] XIE Y Q, ZHAO X M, WANG H, *et al.* Hydrogen bond-associated photofluorochromism for time-resolved information encryption and anti-counterfeiting [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(2): e202414846.
- [2] 安欣, 岳杨, 朱楠楠, 等. SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺, Tm³⁺ 荧光材料的光激励诱导长余辉特性及其防伪应用 [J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 1931-1939.
AN X, YUE Y, ZHU N N, *et al.* Photo-stimulated long afterglow of SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺, Tm³⁺ and its anti-counterfeit applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 1931-1939. (in Chinese)
- [3] ZHAO D, GUO L, LI Q R, *et al.* Multi-functional lanthanide metallopolymer: self-healing and photo-stimuli-responsive dual-emitting luminescence for diverse applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(36): 2405164.
- [4] FU K, QU D H, LIU G F. Reversible circularly polarized luminescence inversion and emission color switching in photo-modulated supramolecular polymer for multi-modal information encryption [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2024, 146(49): 33832-33844.
- [5] ZHAO D, FENG R, LI Q R, *et al.* Lanthanide-containing bilayer polymers with programmable wrinkling dynamics coherent with visible light [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(44): e06382.
- [6] 王阳, 胡珀, 周帅, 等. 稀土上转换发光纳米材料的防伪安全应用 [J]. *化学进展*, 2021, 33(7): 1221-1237.
WANG Y, HU P, ZHOU S, *et al.* Anticounterfeiting and security applications of rare-earth upconversion nanophosphors [J]. *Prog. Chem.*, 2021, 33(7): 1221-1237. (in Chinese)

- [7] LI H L, XUE Z M, YANG G, *et al.* Pyrene-based, red-emitting, aggregation-induced emission luminogens: from structural construction to anti-counterfeiting applications [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2025, 9(2): 318-324.
- [8] LIU J, YANG S S, LIU Q, *et al.* Multi-stimulus response AIE fluorescent hydrogel for “blind box” multistage secure information encryption [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 500: 157458.
- [9] AYOUB I, MUSHTAQ U, NAIR G B, *et al.* Exploring the $\text{Sr}_2\text{Ga}_2\text{GeO}_7:\text{Tb}^{3+}$ long persistent luminescence phosphor for cutting-edge forensic solutions in latent fingerprint detection and anticounterfeiting applications [J]. *Small*, 2025, 21(13): 2500285.
- [10] JI L P, ZHOU J Y, ZHANG J C, *et al.* A multicolor persistent luminescent phosphor $\text{Sr}_2\text{Ga}_2\text{GeO}_7:\text{Pr}^{3+}$ for dynamic anti-counterfeiting [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2019, 102(9): 5465-5470.
- [11] XIAO B L, XIONG P X, WU S, *et al.* Multicolor mechanoluminescence in $\text{Sr}_2\text{Ga}_2\text{GeO}_7:\text{Pr}^{3+}$ for stress sensing and anti-counterfeiting [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(22): 2300911.
- [12] ZHAO D, LI Z X, LI Q R, *et al.* Design, classification, and applications of organic, luminescent lanthanide-based photoresponsive materials: a review [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2025, 540: 216770.
- [13] CHEN J B, LI M S, SUN R R, *et al.* Enhancement of luminescence from lanthanide metal-organic frameworks by ytterbium and calcium doping: application to photonic barcodes and fingerprint detection [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(27): 2315276.
- [14] ZHOU S H, LOU B B, MA C G, *et al.* First-principles study on persistent luminescence mechanism of $\text{LiYGeO}_4:\text{Eu}^{3+}$ [J]. *J. Rare Earths*, 2023, 41(10): 1519-1524.
- [15] ALZARD R H, SIDDIG L A, SALEH N I, *et al.* A new mode of luminescence in lanthanide oxalates metal-organic frameworks [J]. *Sci. Rep.*, 2022, 12(1): 18812.
- [16] ZHAO D, YANG J, TIAN X L, *et al.* Self-healing metallo-supramolecular polymers showing luminescence off/on switching based on lanthanide ions and terpyridine moieties [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 434: 134806.
- [17] KITAGAWA Y, SHIMA K, NAKAI T, *et al.* Thermally-assisted photosensitized emission in a trivalent terbium complex [J]. *Commun. Chem.*, 2023, 6(1): 122.
- [18] 王宗兴, 张月, 赵鹏程, 等. Eu-Tb 镧系双金属有机框架在荧光传感中的应用 [J]. *化学进展*, 2025, 37(4): 612-620.
- WANG Z X, ZHANG Y, ZHAO P C, *et al.* Application of Eu-Tb lanthanide bimetallic organic frameworks in fluorescence sensing [J]. *Prog. Chem.*, 2025, 37(4): 612-620. (in Chinese)
- [19] ZHANG Y M, DU T L, DUAN H, *et al.* Efficient and robust europium (Ⅲ)-based hybrid lanthanide scintillators for advanced X-ray imaging [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(13): e202423155.
- [20] SUN C M, LIU X, ZHUO H M, *et al.* A post-modified lanthanide metal-organic frameworks as ratiometric luminescent sensor for the visual detection of 5-hydroxytryptamine [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2025, 484: 136793.
- [21] BERNOT K, DAIGUEBONNE C, CALVEZ G, *et al.* A journey in lanthanide coordination chemistry: from evaporable dimers to magnetic materials and luminescent devices [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2021, 54(2): 427-440.
- [22] XIE Y, SUN G T, LI J W, *et al.* Er^{3+} -sensitized upconversion/down-shifting luminescence in metal-organic frameworks [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2023, 14(47): 10624-10629.
- [23] GUAN Q, FANG Y L, WU X, *et al.* Stimuli responsive metal organic framework materials towards advanced smart application [J]. *Mater. Today*, 2023, 64: 138-164.
- [24] ZHANG R Y, ZHU L L, YUE B B. A new microporous lanthanide metal-organic framework with a wide range of pH linear response [J]. *Molecules*, 2022, 27(24): 8696.
- [25] DE OLIVEIRA SILVA J L P, COLAÇO M V, DE RESENDE CAMARA A, *et al.* Use of luminescence modulation in a new series of mixed lanthanide metal-organic frameworks for selective firearm ammunition marking [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(51): 50579-50588.
- [26] WANG J Y S, YU M X, CHEN L, *et al.* Construction of a stable lanthanide metal-organic framework as a luminescent probe for rapid naked-eye recognition of Fe^{3+} and acetone [J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 1695.
- [27] WANG J C, GAO Z H, JIA Y J, *et al.* MAPbBr_3 quantum dots encapsulated within lanthanide-MOFs for time-resolved multicolor dynamic anticounterfeiting [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(16): 2501271.
- [28] WANG X R, GOPALSAMY K, CLAVIER G, *et al.* Lanthanide MOF-based luminescent sensor arrays for the detection of

- castration-resistant prostate cancer curing drugs and biomarkers [J]. *Chem. Sci.*, 2024, 15(17): 6488-6499.
- [29] 朱姜昆, 卫尤豪, 高阳旸, 等. 通过烷基官能化的框架材料调控 SP@Tb-MOFs 的动态荧光材料性能并探究其在时间分辨信息加密中的应用 [J]. 中国科学: 材料科学(英文版), 2024, 67(8): 2590-2599.
- ZHU J K, WEI Y H, GAO Y Y, *et al.* Boosting dynamic fluorescent materials using SP@Tb-MOFs through the alkyl functionalization of pores and applications in time-dependent information encryption [J]. *Sci. China Mater.*, 2024, 67(8): 2590-2599. (in English)
- [30] 黄湘兰, 彭俊彪. 稀土掺杂金属氧化物薄膜晶体管研究进展 [J]. 发光学报, 2025, 46(3): 436-451.
- HUANG X L, PENG J B. Research progress on rare earth doped metal oxide thin film transistors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(3): 436-451. (in Chinese)
- [31] ZHAO D, LI Q R, LI H R. Luminescent Eu(III)/Tb(III)-based hybrid soft materials: from system design to potential applications [J]. *Acc. Mater. Res.*, 2025, 6(9): 1133-1146.
- [32] YAN B. Lanthanide functionalized covalent organic frameworks hybrid materials for luminescence responsive chemical sensing [J]. *Chem. Eur. J.*, 2023, 29(45): e202301108.
- [33] PUSHPENDRA, NAIDU B S. Luminescent nanomaterials based covert tags for anti-counterfeiting applications: a review [J]. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2025, 341: 103480.
- [34] WANG J Z, CUI M J, DONG J N, *et al.* Recent progress of luminescent lanthanide-based metal-organic frameworks for anti-counterfeiting application [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2025, 544: 216976.
- [35] AHMED F, MUZAMMAL HUSSAIN M, ULLAH KHAN W, *et al.* Exploring recent advancements and future prospects on coordination self-assembly of the regulated lanthanide-doped luminescent supramolecular hydrogels [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2024, 499: 215486.
- [36] LI Y, CHAI B L, XU H, *et al.* Temperature- and solvent-induced reversible single-crystal-to-single-crystal transformations of Tb^{III}-based MOFs with excellent stabilities and fluorescence sensing properties toward drug molecules [J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2022, 9(7): 1504-1513.
- [37] PAN M, DU B B, ZHU Y X, *et al.* Highly efficient visible-to-NIR luminescence of lanthanide(III) complexes with zwitterionic ligands bearing charge-transfer character: beyond triplet sensitization [J]. *Chem. Eur. J.*, 2016, 22(7): 2440-2451.
- [38] YAGHI O M, LI G M, LI H L. Selective binding and removal of guests in a microporous metal-organic framework [J]. *Nature*, 1995, 378(6558): 703-706.
- [39] LI H L, EDDAOUDI M, O'KEEFFE M, *et al.* Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework [J]. *Nature*, 1999, 402(6759): 276-279.
- [40] 方舟, 贾东升, 李天铭, 等. 量子点修饰 Ln-ZIF 杂化材料的构筑及其对单宁酸的荧光检测 [J]. 发光学报, 2023, 44(9): 1681-1692.
- FANG Z, JIA D S, LI T M, *et al.* Construction of quantum dot-modified Ln-ZIF hybrid materials and fluorescence detection of tannic acid [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(9): 1681-1692. (in Chinese)
- [41] 崔宇铭, 李军军, 李伟, 等. 合成后修饰法构筑的 Eu³⁺@MOF 材料对金属离子的荧光检测 [J]. 发光学报, 2024, 45(1): 169-176.
- CUI Y M, LI J J, LI W, *et al.* Eu³⁺@MOF constructed by post synthesis modification method and its application in detection of metal ions [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(1): 169-176. (in English)
- [42] OZCAN A, COUDERT F X, ROGGE S M J, *et al.* Artificial intelligence paradigms for next-generation metal-organic framework research [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2025, 147(27): 23367-23380.
- [43] LI B, LI Z Q, LI H R. Ultrastretchable luminescent nanocomposite hydrogel with self-healing behavior [J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2022, 4(4): 2329-2336.
- [44] WANG Y, CHEN J L, SHANG Y, *et al.* A stimuli responsive lanthanide-based hydrogel possessing tunable luminescence by efficient energy transfer pathways [J]. *J. Rare Earths*, 2022, 40(5): 696-701.
- [45] YADAV J, PUSHPENDRA, SAMAL S K, *et al.* Sr₂BiF₇: a new bismuth-based host material for lanthanide ions doping: synthesis, downshifting, and upconversion luminescence properties for multimode anticounterfeiting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(38): 51028-51036.
- [46] LIANG T, GUO Z, HE Y F, *et al.* Cyanine-doped lanthanide metal-organic frameworks for near-infrared II bioimaging

- [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(7): 2104561.
- [47] 花景田, 陈宝玖, 孙佳石, 等. 稀土掺杂材料的上转换发光 [J]. 中国光学, 2010, 3(4): 301-309.
HUA J T, CHEN B J, SUN J S, *et al.* Introduction to up-conversion luminescence of rare earth doped materials [J]. *Chin. Opt.*, 2010, 3(4): 301-309. (in Chinese)
- [48] YADAV J, MALLICK R, SAMAL S K, *et al.* Oxygen-induced downshifting and lanthanide upconversion luminescence in Sr_2YbF_7 nanoparticles for dual-mode security applications [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(19): 9830-9842.
- [49] YAN B. Lanthanide-functionalized metal-organic framework hybrid systems to create multiple luminescent centers for chemical sensing [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2017, 50(11): 2789-2798.
- [50] LIANG L J, YANG X, YAN X Y, *et al.* Self-assembly of Eu^{3+} complexes enabling multistimuli-responsive data encryption [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(2): e14252.
- [51] BINNEMANS K. Lanthanide-based luminescent hybrid materials [J]. *Chem. Rev.*, 2009, 109(9): 4283-4374.
- [52] WANG Q, SONG Y H, WU S, *et al.* Dual stimulus responsive GO-modified Tb-MOF toward a smart coating for corrosion detection [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(22): 29162-29176.
- [53] CUI Y Y, BAI Y Y, YANG J P, *et al.* A smart self-indicating metal-organic framework with real-time fluorochromic response for ultraselective thorium remediation [J]. *Nat. Water*, 2026, 4(4): 521-531.
- [54] WEI X H, ZHAO G D, FENG P F, *et al.* Core-shell lanthanide-doped nanoparticles@Eu-MOF nanocomposites for anti-counterfeiting applications [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2022, 5(1): 1161-1168.
- [55] WU B, ZHANG L, YAN K, *et al.* Electronic-symmetry-tuned emission beyond 1 500 nm in erbium(III)-phthalocyanine complexes for high-resolution in vivo biosensing [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2025, 147(48): 44185-44190.
- [56] ZHENG H Q, CUI Y J, QIAN G D. Guest encapsulation in metal-organic frameworks for photonics [J]. *Acc. Mater. Res.*, 2023, 4(11): 982-994.
- [57] RUNOWSKI M, MARCINKOWSKI D, SOLER-CARRACEDO K, *et al.* Noncentrosymmetric lanthanide-based MOF materials exhibiting strong SHG activity and NIR luminescence of Er^{3+} : application in nonlinear optical thermometry [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(2): 3244-3252.
- [58] 张格, 杨向飞, 王晓勇, 等. 稀土纳米晶的上转换发光调控研究进展 [J]. 发光学报, 2023, 44(7): 1149-1166.
ZHANG G, YANG X F, WANG X Y, *et al.* Research progress on upconversion emission modulation of rare earth nanocrystals [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(7): 1149-1166. (in Chinese)
- [59] LI Z, NUNEZ R, LIGHT M E, *et al.* Water-stable carborane-based $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ metal-organic frameworks for tunable time-dependent emission color and their application in anticounterfeiting bar-coding [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(10): 4795-4808.
- [60] PEI K, WU J, ZHAO M, *et al.* Polarized emission of lanthanide metal-organic framework (Ln-MOF) crystals for high-capacity photonic barcodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(3): 2102143.
- [61] CHEN J B, XIE Y, YANG W J, *et al.* Upconversion lanthanide-based 2D metal-organic frameworks for multimode information encryption [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(34): e202509093.
- [62] XIE Y, SUN G T, LI J W, *et al.* Multimode emission from lanthanide-based metal-organic frameworks for advanced information encryption [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(43): 2303663.
- [63] XIE Y, SUN G T, MANDL G A, *et al.* Upconversion luminescence through cooperative and energy-transfer mechanisms in Yb^{3+} -metal-organic frameworks [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(4): e202216269.
- [64] SUN G T, XIE Y, SUN L N, *et al.* Lanthanide upconversion and downshifting luminescence for biomolecules detection [J]. *Nanoscale Horiz.*, 2021, 6(10): 766-780.
- [65] ZHAO X, CHEN S R, YE C Q, *et al.* Triplet-triplet annihilation upconversion combined with afterglow phosphors for multi-dimensional anti-counterfeiting and encoding [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(35): 12853-12862.
- [66] GOU J, HU Y S, XING L X, *et al.* A multi-dimensional anti-counterfeiting nanocomposite based on fluorescent CDs and Eu-MOFs with dual function for continuous detection of Cu^{2+} and *Bacillus anthracis* [J]. *Mater. Today Chem.*, 2024, 41: 102270.
- [67] ZHANG W X, ZHAO Y H, SUN J, *et al.* Fluorescent sensors based on lanthanide-based metal-organic frameworks *via* devices and pH response [J]. *Inorg. Chem.*, 2024, 63(33): 15527-15536.
- [68] SHA H F, YAN B. A pH-responsive Eu(III) functionalized metal-organic framework hybrid luminescent film for amino

- acid sensing and anti-counterfeiting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(19): 7633-7640.
- [69] SHI L L, LIU A L, PANG Y, *et al.* CB[8]-based Ln-MOFs for luminescent sensing of levofloxacin and pH-responsive encryption [J]. *Microchem. J.*, 2025, 218: 115803.
- [70] LI X, WANG H, CHEN J, *et al.* Visible-light-driven photoswitchable fluorescent polymers for photorewritable pattern, anti-counterfeiting, and information encryption [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(44): 2303765.
- [71] GAO R, ZOU Q, SU Q Q, *et al.* Photoresponsive lanthanide-dianthracene framework: introduction of photoactive anthracene pairs by controlling the synthesis temperature [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2025, 36(10): 110404.
- [72] WEI S X, LU W, SHI H H, *et al.* Light-writing and projecting multicolor fluorescent hydrogels for on-demand information display [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(25): 2300615.
- [73] ZHAO D, YE X C, CHEN C, *et al.* Dynamic wrinkling/self-erasing surface with photo-responsive function for advanced information encryption [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 518: 164739.
- [74] 张思敏, 巴泽英, 李天豪, 等. 光响应金属有机框架研究进展及其应用展望 [J]. *发光学报*, 2023, 44(2): 227-239.
- ZHANG S M, BA Z Y, LI T H, *et al.* Advances and application prospect on photoresponsive metal-organic frameworks [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(2): 227-239. (in Chinese)
- [75] LI Z Q, WANG G N, YE Y X, *et al.* Loading photochromic molecules into a luminescent metal-organic framework for information anticounterfeiting [J]. *Angew. Chem.*, 2019, 131(50): 18193-18199.
- [76] LI Y Q, YANG Y H, GUO X L, *et al.* Achieving enhanced photochromism of spiropyran in pretreated nanoporous lanthanide metal-organic frameworks for information storage applications [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2023, 6(7): 5817-5825.
- [77] YANG Y H, LI Y Q, CHEN Y L, *et al.* Dynamic anticounterfeiting through novel photochromic spiropyran-based switch@Ln-MOF composites [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(18): 21330-21339.
- [78] WANG Y N, LI H J, HE X L, *et al.* Application in anticounterfeiting for multistimuli smart luminescent materials based on MOF-on-MOF [J]. *Inorg. Chem.*, 2021, 60(19): 15001-15009.
- [79] LI H J, WANG Y N, JIANG F J, *et al.* A dual-function $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$ encapsulated metal organic framework for ratiometric Al^{3+} detection and anticounterfeiting application [J]. *Dalton Trans.*, 2023, 52(12): 3846-3854.
- [80] GUAN H R, QI M X, SHI L F, *et al.* Ratiometric luminescent thermometer based on the lanthanide metal-organic frameworks by thermal curing [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(14): 18114-18124.
- [81] KACZMAREK A M, LIU Y Y, WANG C H, *et al.* Lanthanide “chameleon” multistage anti-counterfeit materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(20): 1700258.
- [82] ZHANG J C, PAN C, ZHU Y F, *et al.* Achieving thermo-mechano-opto-responsive bitemporal colorful luminescence via multiplexing of dual lanthanides in piezoelectric particles and its multidimensional anticounterfeiting [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(49): 1804644.
- [83] YANG S, XU Y Y, LIN R, *et al.* Conformation-driven responsive 1D and 2D lanthanide-metal-organic framework heterostructures for high-security photonic barcodes [J]. *Small*, 2024, 20(44): 2402890.
- [84] CUAN J, ZHOU H, HUANG X F, *et al.* Hydro-photo-thermo-responsive multicolor luminescence switching of a ternary MOF hybrid for advanced information anticounterfeiting [J]. *Small*, 2024, 20(21): 2305624.
- [85] WANG H L, LI Y L, ZOU H H, *et al.* Smart lanthanide metal-organic frameworks with multicolor luminescence switching induced by the dynamic adaptive antenna effect of molecular rotors [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(29): 2502742.
- [86] GAO J P, YAO R X, CHEN X H, *et al.* Blue luminescent N,S-doped carbon dots encapsulated in red emissive Eu-MOF to form dually emissive composite for reversible anti-counterfeit ink [J]. *Dalton Trans.*, 2021, 50(5): 1690-1696.
- [87] WEI X H, CHUN F J, CAO Y X, *et al.* Reversible thermo/hydrochromic luminescence in a Ln-MOF film for anticounterfeiting application [J]. *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2025, 3(3): 772-778.
- [88] WEI X H, CHUN F J, CAO Y X, *et al.* Disproportionation thermochromic response in a luminescent lanthanide metal-organic framework [J]. *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2024, 2(6): 1217-1223.
- [89] HUANG J H, WU P Y. Controlled assembly of luminescent lanthanide-organic frameworks via post-treatment of 3D-printed objects [J]. *Nano Micro Lett.*, 2021, 13(1): 15.
- [90] WANG R J, ZHANG Y, LU W, *et al.* Bio-inspired structure-editing fluorescent hydrogel actuators for environment-interactive

- information encryption [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(23): e202300417.
- [91] WEI M, HAN J Y, YU C, *et al.* Mass diffusion-dominated phase separation enabling on-demand and repeatable lifetime programming of room-temperature phosphorescence polymer hydrogels [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(7): e17109.
- [92] YU X L, RYADUN A A, PAVLOV D I, *et al.* Highly luminescent lanthanide metal-organic frameworks with tunable color for nanomolar detection of iron(Ⅲ), ofloxacin and gossypol and anti-counterfeiting applications [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(35): e202306680.
- [93] PAN J X, LU J Z, SHANG Y C, *et al.* Tb(Ⅲ)-functionalized MOF hybridized bis-crosslinked networked hydrogel luminescent films for arginine and dopamine hydrochloride sensing and anticounterfeiting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(3): 1198-1206.
- [94] ZHANG D W, ZHOU W, LIU Q L, *et al.* CH₃NH₃PbBr₃ perovskite nanocrystals encapsulated in lanthanide metal-organic frameworks as a photoluminescence converter for anti-counterfeiting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(33): 27875-27884.
- [95] ZHANG B Y, ZHANG M, HUANG S Q, *et al.* Review of the applications of metal-organic frameworks (MOFs) in multi-field detection [J]. *Inorganics*, 2026, 14(4): 93.
- [96] CAO Q, LI S R, MA J T, *et al.* A novel dual-ligand luminescent Eu-based metal-organic framework for ratiometric fluorescence sensing and visual detection of tetracycline [J]. *Microchim. Acta*, 2025, 192(10): 634.
- [97] LU W G, WEI Z W, GU Z Y, *et al.* Tuning the structure and function of metal-organic frameworks *via* linker design [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2014, 43(16): 5561-5593.
- [98] BICALHO H A, TRIFOI L A, QUEZADA-NOVOA V, *et al.* Tuning the photophysical and photochemical properties of rare-earth cluster-based metal-organic frameworks [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2024, 6(10): 7055-7064.
- [99] CHEN C L, WANG C, ZHENG X Y, *et al.* Conductive lanthanide metal-organic frameworks with exceptionally high stability [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(31): 16983-16987.
- [100] ZHANG R Y, ZHU L L, YUE B B. Luminescent properties and recent progress in applications of lanthanide metal-organic frameworks [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2023, 34(2): 108009.
- [101] ZHUO H M, LIU X, SUN C M, *et al.* An amino-functionalized lanthanide-organic framework for ratiometric detection of ONOO⁻ [J]. *Mater. Horiz.*, 2025, 12(18): 7402-7408.
- [102] CHOI C, SELF J L, OKAYAMA Y, *et al.* Light-mediated synthesis and reprocessing of dynamic bottlebrush elastomers under ambient conditions [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2021, 143(26): 9866-9871.
- [103] WEN X, ZHANG K H, WU B Y, *et al.* Multi-mode geometrically gated encryption with 4D morphing hydrogel [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 2830.
- [104] JIANG Z W, GONG X, ZHANG P, *et al.* Energy transfer engineering in lanthanide metal-organic frameworks for ratiometric fluorescence sensing [J]. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 2025, 184: 118133.
- [105] LV W, SONG N, SHAO Y D, *et al.* Dual-emission lanthanide-MOF sensors enabling ratiometric fluorescent detection of 2,4,6-trinitrotoluene with high selectivity [J]. *Inorg. Chem.*, 2025, 64(39): 19812-19821.
- [106] YU X L, PAVLOV D I, RYADUN A A, *et al.* Experimental and theoretical elucidation of the luminescence quenching mechanism in highly efficient Hg²⁺ and sulfadiazine sensing by Ln-MOF [J]. *Angew. Chem.*, 2024, 136(40): e202410509.
- [107] WANG K, ZHU Y L, ZHENG T F, *et al.* Highly pH-responsive sensor based on a Eu^Ⅲ metal-organic framework with efficient recognition of arginine and lysine in living cells [J]. *Anal. Chem.*, 2023, 95(11): 4992-4999.



赵迪(1994-),女,河北邢台人,博士,2026年于河北工业大学获得博士学位,主要从事自修复稀土聚合物以及多功能稀土杂化发光材料的研究。
E-mail: 1170568228@qq.com



李焕荣(1972-),男,山东潍坊人,博士,教授,2002年于中国科学院长春应用化学研究所获得博士学位,主要从事稀土发光材料、银纳米团簇以及多功能聚合物的研究。
E-mail: lihuanrong@hebut.edu.cn