

稀土配位化学在光功能材料中的应用： 从配体设计到荧光传感与信息加密

陈宗康

兰州交通大学化学化工学院，甘肃 兰州

收稿日期：2026年8月3日；录用日期：2026年9月7日；发布日期：2026年9月15日

摘要

稀土离子凭借其独特的4f电子构型和屏蔽的f-f跃迁，展现出窄带发射、长寿命发光和丰富的能级结构等优异光物理性质，成为构建高性能光功能材料的理想光学中心。然而，稀土离子固有的弱吸收能力严重限制了其直接激发效率，这一缺陷通过“天线效应”——由精心设计的有机配体作为高效光捕获单元——得到了有效克服。本文系统综述了稀土配位光功能材料的研究进展，从配体工程的基本原理出发，深入探讨了单核配合物、多核簇合物、配位聚合物、金属有机框架(MOFs)、共价有机框架(COFs)及超分子组装体等不同材料体系的结构-性能关系与演进逻辑。在此基础上，重点介绍了这些材料在荧光传感领域的最新应用，涵盖抗生素检测、生物标志物识别、金属离子传感等前沿方向，并通过总结性表格对各传感体系的检测限、选择性、适用场景和局限性进行了横向比较与批判性评述。进一步地，本文综述了稀土材料在多维度信息加密中的独特优势，包括动态响应加密、时间维度编码及物理不可克隆函数等高级防伪策略。此外，本文系统介绍了机器学习辅助稀土发光材料设计的新范式，从数据驱动预测、图神经网络建模到逆向设计优化，展示了人工智能技术在加速材料发现与性能优化中的巨大潜力。最后，本文展望了该领域面临的挑战与未来发展方向，强调了能量转移动力学的原子级解析、水性稳定体系的构建、生物正交探针开发以及“设计-合成-表征-反馈”闭环研发平台建设等具体可操作的研究路径，旨在为新一代稀土分子光子材料的设计与应用提供系统性参考。

关键词

稀土配合物，光功能材料，天线效应，荧光传感，金属有机框架，信息加密，机器学习

Application of Rare Earth Coordination Chemistry in Photo-Functional Materials: from Ligand Design to Fluorescence Sensing and Information Encryption

Zongkang Chen

文章引用: 陈宗康. 稀土配位化学在光功能材料中的应用: 从配体设计到荧光传感与信息加密[J]. 有机化学研究, 2026, 14(3): 403-415. DOI: 10.12677/jocr.2026.143035

Abstract

Rare earth (RE) ions, characterized by their unique 4f electronic configurations and shielded f-f transitions, exhibit exceptional photophysical properties including narrow-band emission, long-lived luminescence, and rich energy-level structures, making them ideal optical centers for constructing high-performance photofunctional materials. However, the intrinsically weak absorption capacity of RE ions severely limits their direct excitation efficiency—a drawback that has been effectively overcome through the “antenna effect,” in which judiciously designed organic ligands serve as efficient light-harvesting units. This review provides a systematic overview of the research progress in RE coordination-based photofunctional materials, starting from the fundamental principles of ligand engineering and delving into the structure-property relationships and evolutionary logic across diverse material systems, including mononuclear complexes, polynuclear clusters, coordination polymers, metal-organic frameworks (MOFs), covalent organic frameworks (COFs), and supramolecular assemblies. On this basis, the review highlights the latest applications of these materials in fluorescence sensing, covering antibiotic detection, biomarker recognition, and metal ion sensing. A comprehensive summary table is provided for critical comparison of key performance metrics (detection limits, selectivity, applicable scenarios, and limitations) across different sensing systems, accompanied by critical commentary. Furthermore, this review discusses the unique advantages of RE materials in multidimensional information encryption, including dynamic responsive encryption, time-domain coding, and physically unclonable functions (PUFs) for advanced anti-counterfeiting. In addition, we systematically introduce the emerging paradigm of machine learning-assisted design of RE luminescent materials, covering data-driven prediction, graph neural network modeling, and inverse design optimization, demonstrating the great potential of artificial intelligence in accelerating materials discovery and performance optimization. Finally, the challenges and future directions are discussed, with emphasis on specific actionable research pathways such as atomic-scale elucidation of energy transfer dynamics, construction of water-stable systems, development of bioorthogonal probes, and establishment of closed-loop “design-synthesis-characterization-feedback” platforms. This review aims to provide a systematic reference for the design and application of next-generation RE molecular photonic materials.

Keywords

Rare Earth Complexes, Photofunctional Materials, Antenna Effect, Fluorescence Sensing, Metal-Organic Frameworks, Information Encryption, Machine Learning

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，稀土配位光功能材料正处于配位化学、材料科学与光子学的动态交汇点，呈现快速发展态势。自 2020 年以来，相关研究呈现出显著的增长趋势：约 4000 篇出版物聚焦于稀土配合物的设计与合成，2400 篇关注稀土金属有机框架和配位聚合物，2700 篇涉及上转换和下转换纳米材料，1200 篇探讨有机-无机杂化体系，900 篇致力于器件制备和光子集成。这些材料正在推动包括下一代显示技术、近红外

生物成像、光子转换太阳能电池以及高安全性光学加密等广泛领域的突破性进展。

尽管已有大量关于稀土发光材料的综述报道,但现有文献大多按材料类别或应用领域分割,缺乏一个统一的概念框架来系统地连接从分子设计到新兴应用的完整链条。基于此,本文综述旨在提供一个沿着“配体工程 → 可控合成 → 性能调控 → 新兴应用”逻辑轨迹组织的连贯框架,涵盖了从单核配合物到多核簇合物、配位聚合物、MOFs、COFs 以及超分子组装体等全谱系材料体系。特别地,本文将重点聚焦于稀土配位材料在荧光传感领域的最新进展,包括抗生素检测、生物标志物识别、金属离子传感及信息加密等应用,并探讨了机器学习和人工智能辅助材料设计的前沿方向[1]。

2. 配体工程与光物理调控

2.1. 天线效应的基本原理

稀土离子的发光源于其丰富的 $4f^n$ 电子构型,该构型产生密集的能级 manifold 和超过 200,000 种可能的跃迁途径。然而, $f-f$ 跃迁的禁阻性质导致稀土离子的摩尔吸光系数通常小于 $10 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, 严重限制了其直接激发的效率。天线效应通过以下步骤实现了对稀土离子的有效敏化。

能量转移效率主要由配体 T_1 态与稀土离子接受能级之间的能隙(ΔE)决定。对于 Eu^{3+} , 最优的 ΔE 值约为 $2500\sim 3500 \text{ cm}^{-1}$, 对于 Tb^{3+} 则为 $2500\sim 4000 \text{ cm}^{-1}$, 这些范围既能确保高效的能量转移, 又能抑制回传和非辐射损失。因此, 合理的配体设计需聚焦于三个核心天线参数: 高摩尔吸光系数(ϵ)以实现高效光捕获、适当位置的激发态能级以实现共振能量转移、以及刚性的配位环境以最小化非辐射猝灭途径。

值得注意的是, 天线效应并不局限于三重态敏化。实验证据已证实从配体单重态的直接能量转移途径, 包括 $S_1 \rightarrow \text{ILCT}_1 \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ 路径以及针对多种镧系元素高达 10^{12} s^{-1} 的超快 $S_1 \rightarrow \text{Ln}^{3+}$ 转移速率。这些发现表明, 通过内配体电荷转移中间体或超快直接耦合实现的配体单重态直接能量转移, 同样对镧系元素的敏化具有重要贡献。

2.2. 代表性配体体系

如图 1, 依据软硬酸碱理论, 稀土离子作为典型的硬酸, 对氧和氮给体表现出强亲和力。结合其高且灵活的配位数, 这种化学多样性促进了庞大配体库及相应先进材料的发展。代表性配体家族包括: β -二酮配体、卟啉配体、tacn 配体、pycne 配体、cyclen 配体、席夫碱配体、吡啶配体、N-氧化物/磷酸基配体以及新兴手性配体体系。

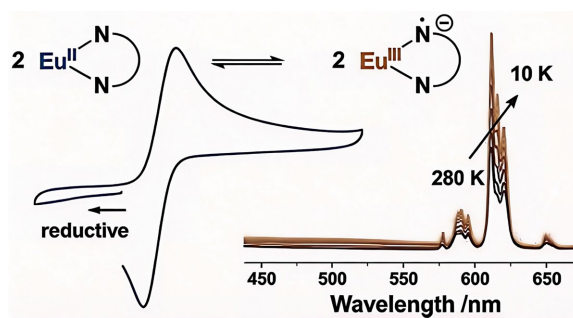


Figure 1. Schematic diagram of the coordination of 1,10-phenanthroline

图 1. 邻菲罗啉配位示意图

2.3. 配体工程策略

配体工程作为精确的“分子调控艺术”, 实现了从光物理输入到功能输出的多维控制。主要策略包

括：

1) 能级调控：通过引入吸电子或给电子取代基来调节配体的 T_1 能级，优化与稀土离子激发态的能级匹配。例如，氟化配体的引入不仅能调节能级位置，还能通过减少 C-H 振动猝灭显著提高近红外量子产率。Shimoji 等人通过引入 As=O 键实现了对 T_1 态的系统调控。

2) 共轭延伸：扩展 π -共轭体系或共价接枝高吸收有机染料可将有效激发窗口从紫外延伸至可见光甚至近红外区域。Rosi 等人采用“瓶中造船”策略，在 Yb-MOF 孔道内生成密集共轭结构，实现了高达 800 nm 的集体近红外激发能力。

3) 振动猝灭抑制：采用全氟化配体设计($-\text{CH}_3 \rightarrow -\text{CF}_3$ 取代)或氟桥架构有效缓解了 C-H 振动猝灭，使 Er-Binol 配合物的近红外量子产率实现了 19 倍的提升(从 0.58%到 11%)。最近，He 等人通过混合配体策略合成的 Tb-FC 簇合物在优化配位条件下达到了 99%的创纪录发射效率。

4) 动态编程：配体工程还实现了发射颜色和寿命的动态编程，配体同时充当“调色板”和“时间编码器”。通过配体桥精确控制离子间距离和耦合强度，可在不改变发射的情况下将发光寿命在数百微秒范围内连续编程，为时间分辨复用、光数据存储和信息加密提供了强大平台。

3. 稀土配位光功能材料的可控合成

从单核配合物到多核簇合物、一维配位聚合物、三维 MOFs 乃至超分子组装体，这一材料维度的递增并非简单的结构复杂化，而是源于三个递进式的科学需求：1) 能量转移效率的提升需求——单核体系中天线-稀土间的能量转移受限于分子内距离，而多核和 extended 结构可通过能量迁移路径的拓展实现更高效率的集光敏化；2) 功能集成度的增强需求——MOFs 的孔道环境为第二功能(如客体封装、尺寸选择性传感)的引入提供了单核体系无法企及的平台；3) 实际应用场景的适配需求——从溶液相均相传感(单核配合物)到固态器件(MOF 薄膜、PUF 标签)，材料形态的演化为不同应用场景提供了对应的解决方案。

3.1. 单核配合物

单核稀土配合物由单个 RE^{3+} 中心封装在确定的有机配位环境中构成，是建立清晰定量构-效关系的典型模型体系。这些配合物不仅是简单的发光体，更是分子尺度的实验室，用于剖析天线效应、阐明能量转移途径以及原子级分辨率地探测配体场影响。

在传感应用方面，Nazaré 等人开发了用于活细菌硝基还原酶检测的时间门控 Tb^{3+} 发光探针。通过 NTR 触发的还原反应，被笼蔽的非敏化天线前体发生酶促还原和自我牺牲活化，形成高效的 carbostyryl 天线，从而开启 Tb^{3+} 发射。在互补策略中，Faulkner 等人设计了基于 Eu^{3+} -phenacyl- DO_3A 衍生物的 Eu^{3+} 配合物用于氰化物检测，其中氰化物的亲核攻击破坏了分子内能量转移途径并猝灭了 Eu^{3+} 发光。

3.2. 多核配合物与簇合物

多核体系通常指核数 ≥ 4 的原子级精确分子聚集体，是合成化学与材料科学的精妙融合。这些结构不仅具有引人注目的结构美学，更为探索能量迁移、协同效应和集体激发态动力学提供了理想平台。

Kong 等人报道了首例 $\text{RE}^{3+}/\text{Cu}^+$ 异金属簇合物 $\text{YbCu}_{34}\text{O}_6\text{Cl}_3(2\text{-MeO-PhC}\equiv\text{C})_{36}$ 。其结构如“蛋”状， $[\text{YbO}_6]^{9-}$ 单元作为“蛋黄”被双层铜“蛋壳”封装。由于 Cu^+ -炔基的强配位作用，该结构异常稳定，并表现出独特的协同发光现象： Yb^{3+} 的引入显著增强了簇合物的近红外 II 区(986 nm)发射，固态量子产率达到 33.3%，创下了铜簇合物的记录。

Wang 等人利用柔性席夫碱配体组装了最高核数的稀土簇合物之一 Ln_{60} ，其创新之处在于具有约 1.5 nm 直径的内部空腔。该空腔可高效负载抗癌药物阿霉素，形成单分散载药纳米粒子(~5 nm)。精确的成分控制还使其可作为超高安全级别的光学条形码以及可调白光发射器。

3.3. 配位聚合物与金属有机框架

一维配位聚合物位于离散配合物和完全延伸的三维固体之间，为研究定向能量转移、偏振发射和维度依赖的激发态动力学提供了独特而易于处理的平台。Sun 等人采用三氟甲基取代的吡啶二酮与 1,10-菲咯啉或 2,2'-联吡啶的组合，构建了螺旋 Eu^{3+} 配位聚合物 $[\text{Eu}(\text{tfpd})_3(\text{phen})]_n$ 和 $[\text{Eu}(\text{tfpd})_3(\text{bipy})]_n$ ，其光致发光量子产率分别达到 68.55% 和 63.81%。值得注意的是，这些材料还表现出高效的力致发光活性和反常的抗热猝灭效应。

稀土金属有机框架(RE-MOFs)代表了从离散分子发射体向集体、可编程光子功能的重要演进。RE-MOFs 通过将稀土离子的“遗传”光物理特性(窄线宽、长寿命、大斯托克斯位移)与晶态多孔框架的固有优势(结构有序性、各向异性、孔隙率和可调性)相结合，实现了功能的高度集成。

1) 金属节点工程：金属节点是 RE-MOFs 发光性质的起源。Chen 等人首次提出并验证了利用混合 RE-MOFs 构建双发射比率发光温度计的策略。通过设计合成一系列异结构 MOFs $\text{Eu}_x\text{Tb}_{1-x}\text{-DMBDC}$ ，其中最优材料 $\text{Eu}_{0.0069}\text{Tb}_{0.9931}\text{-DMBDC}$ 在 10~300 K 范围内表现出独特的温度响应行为。同一研究组进一步将此概念扩展到 X 射线激发发光领域，发展了 $\text{Tb}_x\text{Eu}_{1-x}\text{-BPTC}$ 系列 MOFs 作为智能闪烁体材料。

2) 有机连接体工程：在 RE-MOFs 中，有机连接体不仅作为材料的骨架，还作为“分子编程器”，通过“天线效应”精确调控稀土离子的发光行为。Wang 等人利用具有聚集诱导发光特性的分子转子配体 TPA-COOH 与不同 RE^{3+} 离子组装，构建了一系列层状 RE-MOFs。研究发现 TPA-COOH 配体表现出“动态自适应天线效应”：其三个苯环之间的二面角随温度升高而系统变化，导致其最低三重态能级相应降低。这种动态可调能级使其能够根据不同温度自适应地选择并优化匹配不同稀土离子的能级。

3) 孔道环境工程：MOFs 的固有孔隙率提供了独特的可编程纳米空间。通过选择性封装功能客体物种(如有机染料、钙钛矿纳米晶或金属离子)或工程化固有孔壁功能(如自由碱性位点和分子转子)，RE-MOFs 的光物理性质可被精确调控。Qian 等人通过将蓝光发射花染料封装到多孔 Eu-MOF(ZJU-88)中，所得复合材料 ZJU-88-花表现出染料(~473 nm)和 Eu^{3+} (~615 nm) 的双发射。染料到 Eu^{3+} 的能量转移效率高度依赖于温度，在生理范围(20℃~80℃)内构建了完美的自参比比率温度计，灵敏度达 1.28% $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

3.4. 超分子组装体

超分子组装体通过预形成的发光稀土配合物经由定向非共价相互作用(π - π 堆积、氢键、静电相互作用和疏水效应)的有组织聚集而构建。Tang 等人发展的自组装诱导发光策略是这一方向的典型代表。他们证明 Eu^{3+} - β -二酮配合物可在混合溶剂中自组装形成均匀的 Eu-NPs。在较低水含量(<30%)时， Eu^{3+} 的发光因 O-H 振动失活而被猝灭；然而随着水含量进一步增加，荧光强度逐渐上升，表现出组装诱导发光现象。使用 H_2O 和 D_2O 的对比实验证实，发光增强主要归因于发光中心周围水分子数量的减少以及组装体施加的物理和空间约束，这降低了 Eu^{3+} 配合物非辐射跃迁的概率。

在圆偏振发光方面，Jung 等人最早研究了螺旋结构参数与发光性质之间的直接关联。他们设计合成了具有手性丙氨酸连接体和三联吡啶配位单元的配体(R/S- L^1)。引入 Tb^{3+} 或 Eu^{3+} 离子后，配位驱动的组装使 R- L^1 产生了右手螺旋纳米纤维。原子力显微镜研究揭示了螺旋螺距长度对稀土离子浓度的强烈依赖性。重要的是，发光强度与螺距呈线性相关：较小的螺距对应较大的分子间倾斜角，有效抑制了可能导致猝灭的强面对面 π - π 堆积，从而使发光效率提高了约三倍。

4. 荧光传感应用

4.1. 抗生素检测

抗生素的广泛使用及其在环境中的残留已成为全球性关注问题。稀土配位光功能材料在抗生素检测方面展现出独特优势，特别是基于发光猝灭机制的高灵敏度和高选择性传感。

Chen 等人设计合成了基于 4,4',4'',4'''-(吡嗪-2,3,5,6-四基)四苯甲酸为有机连接体、Eu³⁺为金属节点的荧光传感器 HNU-104，用于呋喃唑酮的快速检测。该材料在 pH 3~11 范围内保持结构稳定性，对 FZD 的检测限达 37.3 ppb。在实际样品分析中，加标回收率为 95.76%~108.62%，相对标准偏差小于 0.10%。机理研究表明，荧光猝灭由内滤效应和光致电子转移的协同作用引起。该工作为食品中 FZD 的快速高选择性检测提供了一个稳健的 Ln-MOF 平台[2]。

Li 等人通过调节金属-配体比例，合成了两种新型 Zn(II)-Eu(III)双金属配位聚合物。配合物 1 呈现四核 Zn₂Eu₂簇结构，而配合物 2 具有离子对双组分结构。两种配合物均发射强红色荧光，可分别用于香兰素和叶酸的检测，检测限分别为 0.18 和 0.23 μM (VAN)以及 0.24 和 0.20 μM (FA)。此外，两种配合物还可用于奶粉中 VAN 和人血清样品中 FA 的检测。荧光猝灭机制归因于竞争吸收和光致电子转移。这项工作展示了通过金属-配体比例调控构建异金属配位聚合物的有效策略及其在荧光传感中的应用潜力[3]。

4.2. 生物标志物检测

生物标志物的精准检测对于疾病的早期诊断和预后监测具有重要意义。稀土配合物凭借其长寿命发光特性，在时间分辨检测中具有天然优势。

Wang 等人构建了基于四核立方烷[Eu₄(μ₃-OH)₄(COO)₄]⁴⁺簇核和 H₂BPDC 配体的二维发光 Eu-MOF，用于类癌生物标志物 5-羟基吲哚-3-乙酸(5-HIAA)的检测。由于 Eu-MOF 与 5-HIAA 分子之间的竞争吸收机制和弱配位相互作用，Eu-MOF 可作为比率型开启-关闭发光传感器，在水溶液和模拟人尿液中实现对 5-HIAA 的可视化和智能化检测，具有优异的灵敏度和选择性。检测限低至 37.16 nM。更重要的是，基于 RGB 色度分析的智能手机辅助方法以及 Eu-MOF@PVA 和 Eu-MOF@PU 薄膜的制备，实现了对 5-HIAA 的智能化和可视化识别[4]。

Zhang 等人开发了基于全氟化卟啉配体的 Yb³⁺光学探针，通过有效抑制高能 C-H 振动模式引起的非辐射失活，实现了前所未有的量子产率。这些经过分子工程改造的探针随后在细胞成像和小鼠模型体内成像中得到验证，展示了其优异的亮度和生物相容性。重要的是，为了充分利用近红外发射镧系元素的长激发态寿命，他们进一步将这些探针扩展到 900~1700 nm 近红外窗口的时间分辨荧光寿命成像显微镜。这种方法实现了深层组织穿透，并提供了定量可视化体内分子事件的独特能力，其本质上独立于局部发光强度和探针浓度。

4.3. 金属离子传感

金属离子的选择性检测是环境监测和生物医学研究的重要需求。稀土 MOFs 凭借其可设计的活性位点和孔道环境，在金属离子传感方面展现出独特优势。

Wei 等人合成了基于 Eu³⁺离子与强发射配体 H₂BTDB 的发光镧系金属有机框架 Eu-TD。该材料对 Al³⁺离子表现出卓越的选择性，检测限低至 0.04 μM，并具有优异的抗干扰性能。Eu-TD 在不同水环境基质中对 Al³⁺均表现出显著的发光开启响应，证实了其在环境监测应用中的可行性。选择性识别机制源于 Lewis 碱性 N 位点通过酸碱相互作用与 Al³⁺的强配位，同时增强了吸光度并放大了发光。XPS 分析确认了 N 介导的配位作用，而 TDDFT 计算揭示了 Al³⁺配位后 HOMO-LUMO 能隙的显著降低[5]。

Li 等人构建了基于紫精配体的多功能 Eu-MOF，实现了光致变色、光调制发光和质子传导的多重功能集成。在紫外光照射下，配合物因光致电子转移形成紫精自由基而从无色变为蓝色。伴随着光致变色过程，Eu³⁺的特征红色荧光逐渐猝灭，这一可逆过程可用于多信息防伪。同时，由于结构中存在大量配位水和自由水分子形成丰富的氢键网络，该材料表现出优异的光调制质子导电性能。

4.4. 稀土配合物荧光传感器关键性能横向对比

如表 1，Turn-off 型传感器灵敏度高但选择性不足，易受共存物质干扰；Ratiometric 型通过自参比消除环境波动影响，但材料设计复杂度显著提升；Turn-on 型在信噪比方面具有天然优势，但“开启”机制往往依赖于特定分析物与传感位点的强相互作用，限制了通用性；实际样品基质(血清、尿液、食品提取物)中的蛋白质、盐类等成分对传感性能的影响在多数研究中未被充分评估；成本效益分析表明，简单配合物体系适合一次性检测场景，而 MOF 体系虽性能优异但合成成本较高，更适合于重复使用或集成化器件。

Table 1. Comparative analysis of key performance metrics for rare-earth complex fluorescent sensors

表 1. 稀土配合物荧光传感器关键性能横向对比

传感器材料	目标分析物	传感模式	LOD	线性范围	选择性	基质效应	成本	适用场景	局限性
HNU-104 (Eu-MOF)	呋喃唑酮	Turn-off	37.3 ppb	0~20 ppm	中等	较低	低	饲料、水样现场快检	无法区分同类硝基呋喃类药物
Zn ₂ Eu ₂ 配合物	香兰素	Turn-off	0.18 μM	0~20 μM	高	中等	低	奶粉添加剂检测	实际样品前处理繁琐
Zn ₂ Eu ₂ 配合物	叶酸	Turn-off	0.24 μM	0~20 μM	高	中等	低	血清样品检测	需结合时间分辨技术排除背景干扰
Eu-MOF (BPDC)	5-HIAA	Ratiometric	37.16 nM	0~28 μM	高	较低	中等	尿液类癌 biomarker 检测	智能手机辅助仍需标准化
Eu-TD	Al ³⁺	Turn-on	0.04 μM	40~70 μM	卓越	低	中等	水环境监测	响应时间较长
Eu-紫精 MOF	-	光致变色	-	-	-	-	中等	防伪加密	可逆性及循环稳定性待考

5. 多维度信息加密

稀土配位光功能材料凭借其高色纯度、长寿命、上/下转换能力和刺激响应性等独特发光特性，成为构建高安全性光学防伪和信息加密系统的理想平台。其发展已从早期依赖静态发射颜色的一维安全性，演进到综合利用时间维度(寿命)、动态响应性、空间维度(结构或手性光致发光)和物理不可克隆函数的多级系统[6]。

5.1. 动态与多响应加密

动态加密要求材料能够基于预定义的可逆或不可逆外部刺激改变其光学输出，从而隐藏或揭示信息。与基于静态颜色的加密相比，动态系统通过引入刺激依赖逻辑、时间演化和条件可访问性，显著提高了安全性[7]。

Gao 等人提出了晶格应变工程策略，通过有意扭曲拓扑网络构建具有刺激响应上转换特性的 Eu/Tb@Yb-BTC MOFs。该晶格应变缩短了敏化剂和激活剂之间的平均距离，从而增强了能量转移效率，

并显著抑制了非辐射跃迁概率。利用该 MOF 的负热膨胀特性, 温度作为外部刺激可逆地调节晶格参数, 赋予发光强度动态热响应行为, 为信息加密提供了强度切换模式[8]。

Wang 等人利用 TPA-COOH 动态分子转子作为智能响应单元构建了稳定 Ln-MOFs。螺旋桨状 TPA-COOH 配体通过调节旋转自由度和扭转角来响应温度变化。这种分子尺度的构象变化直接改变了其与不同稀土离子(如 Tb^{3+} 和 Eu^{3+})激发态能级的匹配程度。因此, 温度刺激驱动了 Tb^{3+} 和 Eu^{3+} 之间能量转移路径的切换, 导致宏观发光颜色在绿色和红色之间可逆变化[9]。

5.2. 时间维度与物理不可克隆加密

基于发光寿命这一内在物理参数的编码赋予了系统独立于强度且抗背景干扰的高安全性加密。Kitagawa 等人提出了一个革命性范式。在混合 $\text{Lu}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ (或 Tb^{3+}) 分子晶体中, 菲基配体之间的缓慢三重态激子迁移延迟了最终能量转移至发光稀土离子的过程。通过改变发光离子浓度或配体结构, Eu^{3+} 的发射寿命从 0.55 ms 大幅延长至 148 ms, Tb^{3+} 的发射寿命从 0.83 ms 延长至 152 ms。这种“动态分子三重态激子”机制打破了传统调谐范围, 同时通过缓慢激子迁移实现了高效的分子间敏化, 即使在低发光离子浓度下也能保持相对较高的亮度, 从而极大地扩展了光学编码容量[10]。

物理不可克隆函数利用材料制备过程中固有的、不可控的随机性来生成独特的微观特征。Tang 等人利用 Eu-NPs 在滴铸过程中的随机组装模式制备了 PUF 标签, 基于发光强度分布和寿命成像实现了双密钥认证, 编码容量超过 4^{1600} 。他们进一步利用稀土配合物作为“分子胶水”引导纳米粒子随机组装的策略构建 PUF。通过采用正电荷 Eu^{3+} 配合物($[\text{EuL}_3]^{3+}$)作为“离子胶”介导负电荷银纳米粒子的静电自组装, 所得随机结构不仅调控了 Eu^{3+} 的荧光和寿命, 还表现出显著的表面增强拉曼散射, 建立了集成荧光、寿命和拉曼信号的多模式 PUF 认证系统[11]。

5.3. 多维集成加密平台

更高安全级别要求集成多个独立信号维度和响应模式。Tang 等人基于碳点和 Eu^{3+} 配合物构建了刺激响应纳米复合材料 CDs-Eu-HL, 用于多维光记录。该材料在酸/碱蒸汽暴露下表现出可逆的颜色变化(蓝色/蓝紫色)。更重要的是, 碳点的纳秒荧光寿命与 Eu^{3+} 的微秒寿命的组合允许在时间维度进行信息编码。利用时间门控成像技术, 隐藏信息可在特定延迟时间读取, 实现了空间(颜色)和时间(寿命)双维度的加密。

Duan 等人通过将多层核壳稀土纳米粒子(表现从紫外到近红外 II 区的宽谱带上/下转换发射)与手性液晶聚合物薄膜共组装, 实现了全色域多模式 CPL。值得注意的是, 通过滴铸法制备的复合薄膜表现出视角依赖的 CPL 信号, 源于 CLP 薄膜的光子带隙效应和纳米粒子的不对称分布。这一特性可用于高级图像防伪和二元信息加密系统[12]。

6. 机器学习辅助的稀土发光材料设计

发光材料的传统研发模式长期依赖于“试错法”或“经验指导实验”, 即通过大量重复实验逐步筛选最优组分和合成条件。然而, 稀土发光材料的设计空间极为庞大——掺杂离子的种类与浓度、基质晶体的组成与结构、合成温度与时间、表面修饰与后处理等因素的组合呈指数级增长, 使得传统的实验探索方式日益难以为继。近年来, 随着材料基因组计划的推进和计算能力的提升, 数据驱动的研发范式正在深刻改变稀土发光材料的设计路径。机器学习作为一种能够从数据中自动提取规律并做出预测的强大工具, 已在这一领域展现出巨大的应用潜力。

6.1. 从“试错”到“预测”的范式转变

稀土发光材料的研发正经历着从传统的“经验指导实验”向“理论预测、实验验证”新模式的深刻

转变。这一转变的核心驱动力在于：高效的理论预测方法(如高通量计算和机器学习)与快速的实验验证手段(如单颗粒诊断法)的协同发展，为新型发光材料的研制奠定了理论和实验基础。数据驱动方法的优势在于其能够从已有的实验和计算数据中提取隐含的物理规律，从而指导新材料的设计与性能优化。然而，发光材料领域目前仍缺乏大规模、标准化的公开数据库。现有数据主要来源于三个方面：第一，第一性原理计算(如密度泛函理论)产生的高通量计算数据；第二，无机晶体结构数据库(如 ICSD、COD)提供的晶体结构信息；第三，从海量文献中通过数据挖掘技术提取的实验数据。近年来，大语言模型(如 GPT-4)已被成功应用于从学术论文中自动挖掘化学式和发射波长等关键信息。例如，研究者利用 GPT-4 从 274 篇论文中提取了 264 种 Eu^{2+} 掺杂荧光粉的化学式和发射波长数据，为后续的机器学习建模提供了宝贵的数据基础[13]。

6.2. 核心算法与建模策略

机器学习在稀土发光材料研究中的应用，已从最初的数据处理与特征提取，发展到性能预测、高通量筛选乃至逆向设计等多个层次。1) 监督学习与性能预测。监督学习是最为广泛应用的范式，其目标是建立材料特征(输入)与目标性能(输出)之间的定量关系。常用算法包括支持向量回归、随机森林、极端梯度提升(XGBoost)等。例如，研究者采用支持向量回归模型成功预测了 Eu^{3+} 取代荧光粉的热猝灭行为；随机森林模型则被用于预测 Dy^{3+} 掺杂玻璃的 Judd-Ofelt 光谱参数，显著减少了实验测试的需求。在发射波长预测方面，XGBoost 模型展现了显著的优势[11]。Zhuo 等人基于约 2800 组密度泛函理论计算数据，训练了支持向量回归模型来预测 Ce^{3+} 的 5d 能级重心位移，该参数对于理解稀土离子的发光和热响应行为至关重要。2) 图神经网络与结构-性能关系建模。传统的机器学习模型通常以材料的组分特征作为输入，难以充分捕捉晶体结构和局域配位环境对发光性能的影响。图神经网络(GNN)通过将原子表示为节点、化学键表示为边，能够直接在原子层面上学习结构-性能关系。在稀土发光材料领域，研究者系统比较了三种 GNN 架构(CGCNN、MEGNet 和 GATGNN)在 Eu^{2+} 掺杂荧光粉发射能量预测中的表现，发现 GATGNN 模型取得了最优性能，发射能量预测的平均绝对误差仅为 0.18 eV。基于该模型，研究者对 12,558 种候选材料进行了高通量筛选，成功预测出 68 种新型紫光激发荧光粉。此外，GPT-4 与 CGCNN 的结合被用于开发稀土掺杂荧光粉，通过迁移学习将带隙预测模型微调至荧光粉发射波长的预测任务。3) 深度学习与逆向设计。逆向设计是指从目标性能出发，反向搜索最优的材料结构和组成，这是机器学习赋能材料设计的终极目标之一。在核壳上转换纳米粒子领域，研究者构建了大规模光谱数据集并训练异质图神经网络，成功识别出比训练集中最优结构亮度高出 6.5 倍的新型纳米颗粒。该方法通过可微分的深度学习代理模型绕过了模拟复杂核壳结构的高昂计算成本[40]。在另一项研究中，通过将贝叶斯优化与动力学蒙特卡罗模拟相结合，仅经过 40 次迭代就实现了上转换纳米颗粒发射亮度 110 倍的提升[14]。4) 模型可解释性分析。机器学习模型的“黑箱”特性曾是其被材料科学家接受的主要障碍之一。近年来，SHAP (SHapley Additive exPlanations)等可解释性分析工具被引入稀土发光材料研究，用以揭示材料特征与发光性能之间的因果关系。例如，在对 $\text{Mn}^{4+}/\text{Eu}^{3+}$ 掺杂荧光粉的荧光寿命预测研究中，研究者通过 SHAP 分析系统考察了材料结构特征对荧光寿命的影响权重。这种可解释性分析不仅增强了模型的可信度，还为理解发光机理提供了新的视角[15]。

6.3. 机器学习在稀土发光材料中的典型应用

1) 荧光粉发射性能预测与高通量筛选。发射波长、荧光寿命和量子产率是评价荧光粉性能的核心指标。传统的实验测定耗时费力，且结果易受材料结构、缺陷、温度和合成方法等多种因素的影响。机器学习为这些性能的快速预测提供了有效途径。在对 $\text{Mn}^{4+}/\text{Eu}^{3+}$ 掺杂荧光粉的研究中，研究者构建了多特征

数据集,系统评估了四大类共 16 种机器学习模型,经贝叶斯优化的随机森林回归模型在测试集上的决定系数 R^2 达到 0.81~0.99。该方法无需实验测量即可快速评估新型荧光粉的发光寿命,为材料筛选提供了高效、低成本的工具。在 Eu^{2+} 掺杂白磷钙矿型荧光粉的研究中,组分特征驱动的预测模型被用于发射波长的精准预测。此外,研究者还开发了两步法机器学习模型用于预测石榴石型氧化物中 Ce^{3+} 的 $4f \rightarrow 5d$ 跃迁能量,该模型首先基于第一性原理计算获取电子结构参数,再通过多层感知机神经网络绕过第一性原理计算直接基于结构参数进行预测[16]。2) 上转换纳米颗粒的机器学习优化。上转换纳米颗粒的光物理性质受掺杂离子种类、浓度、基质晶体、核壳结构和反应条件等多个高维参数的共同调控,传统的试错法几乎无法有效遍历这一巨大的组合空间。机器学习的介入为上转换纳米颗粒的理性设计开辟了新路径。早期的工作聚焦于利用自动化的实验平台和物理模型(如微分速率方程)在高维组分空间中导航。随后,机器学习被用于处理原始表征数据,如自动分析透射电镜图像和时间分辨发光曲线。最具突破性的进展体现在闭环主动学习策略上:通过将贝叶斯优化与动力学蒙特卡洛模拟耦合,研究者在仅 40 次迭代内实现了上转换纳米颗粒发射 110 倍的增强[17]。进一步地,基于异质图神经网络的可微分深度学习代理模型被用于逆向设计,成功预测出比训练集中最亮结构亮 6.5 倍的新型核壳纳米颗粒。3) 机器学习辅助的荧光传感与智能识别。机器学习不仅在材料设计阶段发挥作用,在传感数据的智能解析方面同样展现出独特优势。在抗生素检测领域,研究者开发了 Eu^{3+} 功能化的 UiO-66-NH_2 金属有机框架荧光传感器,用于四环素类抗生素的检测。将荧光响应数据与随机森林算法相结合,实现了对三种四环素类抗生素的智能区分,分类准确率达到 95.24% [18]。在农药检测方面,研究者设计了 La/Eu-BTC 双金属 MOF,实现了光-电双模式传感;机器学习辅助的荧光猝灭建模有效处理了非线性的荧光响应,显著提升了定量分析的准确性[19]。荧光传感器的最低检测限达到 0.7 ng/mL。这些研究表明,机器学习与稀土发光传感器的深度融合,正在将传统的“信号响应”式传感升级为“智能识别”式传感。4) 稀土掺杂玻璃与激光材料的设计。机器学习也被应用于稀土掺杂玻璃体系的光谱性能预测。研究者以 Dy^{3+} 掺杂的 $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 玻璃体系为对象,基于玻璃组分训练了随机森林回归模型来预测 Judd-Ofelt 光谱参数。结果表明,该模型能够有效模拟稀土掺杂玻璃的发光性能,显著减少实验测试的需求。在激光玻璃领域,机器学习被用于建立成分-结构-发光特性之间的关联,加速了新型激光玻璃材料的开发[20]。

6.4. 挑战与展望

尽管机器学习在稀土发光材料领域已取得了令人瞩目的进展,但该领域仍面临着若干关键挑战。数据稀缺与质量问题。与计算机视觉、自然语言处理等领域动辄百万级的数据规模相比,稀土发光材料的可用数据仍然十分有限。现有的实验数据分散于海量文献中,缺乏统一的格式和标准;计算数据虽可通过高通量第一性原理计算大量生成,但其准确性受限于交换关联泛函的选择和计算参数的设置。发展标准化的材料数据库、建立数据共享机制、以及利用迁移学习和数据增强技术缓解数据稀缺问题,是未来亟需突破的方向[21]。如何设计能够有效表征稀土离子局域配位环境、晶体场强度和电子结构的物理描述符,是决定模型预测精度的关键。当前的研究趋势是将物理先验知识(如晶体场理论、能级匹配原则)嵌入机器学习模型,构建“物理 informed”的机器学习框架。这种融合了物理洞察的数据驱动方法,有望在数据有限的条件下实现更可靠的预测。从预测到发现的跨越。目前的机器学习研究大多聚焦于已知材料体系的性能预测,而真正意义上的“新材料发现”仍处于起步阶段。高通量筛选虽然可以快速评估大量候选材料,但其预测结果仍需实验验证[22]。将机器学习的预测能力与自动化合成、高通量表征技术相结合,构建“设计-合成-表征-反馈”的闭环研发平台,将是实现从“加速已知”到“发现未知”跨越的关键路径。模型的可解释性与物理可信度。“黑箱”模型虽然能够做出准确预测,但其内部决策过程难以被研究者理解,这限制了模型在机理发现方面的价值。发展可解释的机器学习方法,使模型不仅能

够预测性能，还能揭示决定性能的关键物理因素，对于推动发光机理的理解和新材料的设计具有双重意义[23]。

7. 总结与展望

本文系统综述了稀土配位光功能材料的广阔领域，涵盖从分子工程策略到新兴应用的完整链条。该领域目前正经历深刻范式转变——研究焦点正从传统上对孤立光物理参数(如发射颜色和效率)的追求，转向探索如何弥合能量形式与材料状态之间的差距，以实现能量和信息的精确、高效、智能转换。因此，这些材料的功能角色正从被动的“发射体”演变为主动的“智能能量-信息枢纽”。

然而，这一雄心勃勃的转型面临着三个相互交织的基础科学挑战：能量通道中的绝缘屏障、材料循环中的生物相容性缺口，以及信息处理的维度限制。克服这些挑战不仅需要解决特定的技术瓶颈，还需要推动材料体系向着功能解耦与协同、生物逻辑集成和信息智能化的新前沿迈进。

1) 能量通道的绝缘屏障：这一挑战体现在光物理机制瓶颈上：Dexter 电子交换、Förster 共振能量转移和电荷转移态等多重能量转移路径之间的竞争与协同仍未得到充分理解，阻碍了向能量转移效率理论极限的推进。未来突破的关键在于通过原子和分子尺度的界面工程实现“功能解耦与协同”，将能量捕获、转移和发射分配给异构体系中最胜任的单元，实现超高效耦合。结合 AI 驱动的逆设计，可为目标光电器件性能自动生成最优异构结构方案[24]。

2) 材料循环的生物相容性缺口：大多数高性能稀土配合物稳定性不足，在水性、氧化性或光条件下容易发生配体解离和光降解。从稀土生物地球化学循环中获得的启示表明，生物体可调控稀土离子定向结晶为生物矿物，这启发了“环境智能”形成路线。合成生物学工具可设计酶或人工细胞，在生理条件下合成、组装和修复稀土材料。仿生合成方法，如预测具有增强稳定性的人工分子或肽序列，为生物相容性材料提供了蓝图。

3) 信息处理的维度限制：虽然基于独特稀土能级的多重荧光编码已被用于生物成像，但信息维度(颜色、强度、寿命等)仍未得到充分利用，且缺乏对复杂信号的逻辑解码。前沿愿景旨在通过将独特的分子识别单元与稀土发光中心耦合，构建“稀土分子光电化学逻辑门”。利用基于能量转移、电子转移或配位场切换的机制，这些系统可光学执行布尔逻辑操作，直接报告“AND”或“OR”等复杂状态。

4) 具体方向：a) 能量转移通道的原子级解析：结合超快光谱(飞秒-纳秒时间分辨)与冷冻电镜或单晶 XRD，在原子尺度上实时追踪从配体激发到稀土发射的完整能量流动路径，建立能量转移效率的定量预测模型。b) 水性稳定的稀土配合物设计：开发具有第二代或第三代配体(如大环配体、穴醚配体)的稀土配合物，通过多齿螯合效应和疏水外壳层设计，将配合物在水相中的半衰期从数小时提升至数天以上。c) 生物正交稀土探针的开发：利用点击化学或非天然氨基酸嵌入技术，将稀土配合物定点标记于目标生物分子，实现活细胞内特定蛋白质构象变化的实时追踪。d) 机器学习驱动的配体高通量筛选：构建包含配体结构描述符(HOMO/LUMO 能级、三重态能级、配位原子类型等)与稀土发射性能的数据集，训练图神经网络或随机森林模型，实现目标发射波长和量子产率的逆向设计。e) 柔性可穿戴稀土传感平台的构建：将稀土配合物或 MOF 材料与柔性基底(水凝胶、纺织品、PDMS 薄膜)集成，开发面向汗液、泪液等生物体液的连续监测传感器[25]。f) 稀土光功能材料的生命周期评估：建立从配体合成、材料制备到器件废弃的全链条环境影响评价体系，推动绿色合成路线的开发。

参考文献

- [1] Song, F., Su, P., Li, X., Yan, C., Zhang, J. and Tang, Y. (2026) Harnessing Rare Earth Coordination Chemistry for Advanced Photofunctional Materials: From Fundamental Principles to Emerging Technologies. *Chemical Society Reviews*, **55**, 5117-5197. <https://doi.org/10.1039/d5cs00384a>

- [2] Chen, S., Ye, J., Wang, L., Lin, Y., Gong, Y., Xiao, M., *et al.* (2026) Lanthanide Metal-Organic Framework Fluorescent Sensor for the Detection of Furazolidone in Tap Water and Animal Feed. *Inorganic Chemistry*, **65**, 5214-5221. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6c00129>
- [3] Li, S., Zhao, F., Li, Z. and Wu, X. (2025) Modulated Synthesis of Two Fluorescent Zn(II)-Eu(III) Bimetallic Coordination Polymers for Sensing of Vanillin and Folic Acid. *Crystal Growth & Design*, **25**, 6940-6953. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5c00874>
- [4] Wei, S., Chen, J., Hou, S., Sun, B., Ren, J., Wang, X., *et al.* (2025) Sensitive and Anti-Interference Al³⁺ Sensing with a Luminescent Eu-MOF. *Inorganic Chemistry*, **64**, 18394-18400. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5c02902>
- [5] Wang, E., Li, L., Zou, J., You, S., Hu, R., Zhang, L., *et al.* (2025) Regulating the Energy Level of a Ratiometric Luminescent Europium(III) Metal-Organic Framework Sensor with Smartphone Assistance for Real-Time and Visual Detection of Carcinoid Biomarker. *Inorganic Chemistry*, **64**, 3930-3940. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.4c05180>
- [6] Li, K., Shen, Y., Li, S. and Zhang, X. (2024) A Multifunctional Eu-MOF with Multi-Color and Proton Conduction Switching and Its Anti-Counterfeiting Applications. *Dyes and Pigments*, **224**, Article 112033. / <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112033>
- [7] Zhao, F., Li, S., Song, Z. and Li, Z. (2026) Ratiometric Detection of Propyl Gallate Based on Two Zn(II)-Tb(III) Coordination Polymers Modulated by Metal-Ligand Ratios. *Inorganic Chemistry*, **65**, 8716-8728. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6c00697>
- [8] Li, S., Zhai, W., Chi, Y., Li, Z. and Zhao, F. (2026) Two Dual-Emission Zn(II)-Tb(III) Coordination Polymers Controlled by Metal-Ligand Ratios for Ratiometric Sensing of Malachite Green. *Inorganic Chemistry*, **65**, 2030-2044. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5c05330>
- [9] Wu, X., Liu, S., Zhao, Y., Li, Z. and Zhao, F. (2026) Smartphone-Integrated Ratiometric Sensor Based on a Sm(III)-MOF for Dual-Functional Detection of Vitamin B₂ and Levofloxacin. *Crystal Growth & Design*, **26**, 4916-4928. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6c00171>
- [10] Zhao, F., Li, S., Li, Z. and Wu, X. (2025) Metal-Ligand Ratio-Controlled Synthesis of Two Zn(II)-Eu(III) Coordination Polymers for Ratiometric Fluorescence Sensing of Sodium Salicylate. *Inorganic Chemistry*, **64**, 18458-18470. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5c03031>
- [11] Dhankhar, P., Bedi, M., Khanagwal, J., Taxak, V.B., Khatkar, S.P. and Doon, P.B. (2020) Photoluminescent Report on Red Light Emitting Europium(III) Complexes with Heterocyclic Acid. *Spectroscopy Letters*, **53**, 256-269. <https://doi.org/10.1080/00387010.2020.1736099>
- [12] Ilmi, R., Xia, X., Dutra, J.D.L., Santos, G.S., Zhou, L., Wong, W., *et al.* (2024) Highly Efficient Red-Emitting Oleds Prepared from Nona-Coordinated Europium(III) Complexes. *ACS Applied Electronic Materials*, **6**, 2624-2638. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c00208>
- [13] Jiang, M., Xiao, X., He, B., Liu, Y., Hu, N., Su, C., *et al.* (2019) A Europium (III) Complex-Based Surface Fluorescence Sensor for the Determination of Uranium (VI). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **321**, 161-167. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06566-x>
- [14] Borrisov, B., Tsvetkov, M., Zahariev, T., Elenkova, D., Morgenstern, B., Dimov, D., *et al.* (2024) Effect of Pyrrolidinedithiocarbamate Ligand on the Luminescence Properties of Heteroligand Samarium and Europium Complexes: Experimental and Theoretical Study. *Inorganic Chemistry*, **63**, 13840-13864. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.4c00134>
- [15] Straub, L.C., Adlung, M., Wickleder, C., Wickleder, M.S. and Rasche, B. (2023) Impact of 1,10-Phenanthroline-Induced Intermediate Valence on the Luminescence of Divalent Europium Halides. *Inorganic Chemistry*, **62**, 497-507. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c03647>
- [16] Yazhini, C., Mathew, G., Anpo, M., Maurin, G., Choi, W. and Neppolian, B. (2024) Decoding the Mechanistic Strategies of Lanthanide-Based Luminescent Metal-Organic Frameworks Towards Antibiotic Detection. *Advanced Optical Materials*, **12**, Article 2301625. <https://doi.org/10.1002/adom.202301625>
- [17] Li, Y., Shi, X., Min, H., Li, T. and Yan, B. (2024) Fluorescence Array Sensor Based on Lanthanide Complex for Pattern Recognition Detection of Fluoroquinolone Antibiotics. *Talanta*, **280**, Article 126719. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126719>
- [18] Zhang, W., Song, Y., Lv, Y., Sun, J., Cui, Y., Li, X., *et al.* (2025) Smartphone-Integrated Fluorescent Sensing Array Assembled from Lanthanide Metal-Organic Frameworks for Rapid Identification and Differentiation of Antibiotics in Daily Foods. *Analytical Chemistry*, **97**, 18742-18749. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5c03462>
- [19] Yan, B., Wu, H., Ma, P., Niu, J. and Wang, J. (2021) Recent Advances in Rare Earth Co-Doped Luminescent Tungsten Oxygen Complexes. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **8**, 4158-4176. <https://doi.org/10.1039/d1qi00681a>
- [20] He, T., Gao, H., Diao, X., Muhammad, Y., Chen, C., Wang, H., *et al.* (2024) Ratiometric Visualization Fluorescence Temperature Sensing Based on Dual-Lanthanide Metal-Organic Frameworks. *Journal of Molecular Structure*, **1316**,

- Article 139071. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139071>
- [21] Yuan, X., Meng, X., Zhang, S., Liu, W. and Zhang, J. (2026) Recent Progress in Metal-Organic Gels for Fluorescent Sensing: Design, Mechanisms, and Applications. *Analytical Methods*, **18**, 219-237. <https://doi.org/10.1039/d5ay01920f>
- [22] Bej, S., Wang, X., Zhang, J., Yang, X. and Ren, P. (2024) Upconversion and Downshifting of the Luminescence of Reticular Lanthanide Metal-Organic Frameworks for Biomarker Signalling: Where Do We Stand in 2024? *Coordination Chemistry Reviews*, **513**, Article 215862. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215862>
- [23] Wu, N., Bo, C. and Guo, S. (2024) Luminescent Ln-MOFs for Chemical Sensing Application on Biomolecules. *ACS Sensors*, **9**, 4402-4424. <https://doi.org/10.1021/acssensors.4c00614>
- [24] Song, Z., Hao, Y., Long, Y., Zhang, P., Zeng, R., Chen, S., *et al.* (2025) Luminescent Lanthanide Infinite Coordination Polymers for Ratiometric Sensing Applications. *Molecules*, **30**, Article 396. <https://doi.org/10.3390/molecules30020396>
- [25] Lin, W., Yi, L., Ren, G., Zhou, Q. and Pan, Q. (2026) Recent Advances in Lanthanide-Based MOFs for Luminescence Detection. *Dalton Transactions*, **55**, 8446-8475. <https://doi.org/10.1039/d6dt00399k>