

基于 *L/D*-赖氨酸盐酸盐和光活化 AIE 分子共组装 实现圆偏振发光及动态调控

冯锡成^a 朱亮亮^b 岳兵兵^{*a}

(^a 上海理工大学材料与化学学院 上海 200093)

(^b 复旦大学高分子科学系 聚合物分子工程国家重点实验室 上海 200438)

摘要 近年来, 基于分子组装产生圆偏振发光(CPL)的有机手性材料得到了迅猛的发展. 然而, 目前有机材料体系的 CPL 信号整体仍然较弱, 且缺乏精准的调控手段. 为此, 本工作以具有光活性的聚集诱导荧光增强(AIE)性质的多硫苯基化合物(M-1)为荧光染料, 以手性氨基酸 *L/D*-赖氨酸盐酸盐(*L/D*-Lys)为手性模板, 通过分子间氢键作用, 在 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)/H₂O 的混合溶剂中形成超分子 *L/D*-Lys@M-1 共组装体. 共组装体在不良溶剂水的溶剂作用下诱导产生 CPL, 且在紫外光激发下具有自聚集效应, 产生持续增强的荧光发射和圆二色(CD)信号. 通过荧光光谱、紫外吸收光谱和动态光散射(DLS)对组装体在光激发下的结构和物理性质进行表征, 利用 CD 光谱以及 CPL 光谱等对基态和激发态手性性质进行研究. 结果表明, 在溶剂诱导和光激发下实现了 *L/D*-Lys@M-1 组装体的手性传递和放大, 且不对称因子($|g_{lum}|$)达到了 0.3×10^{-2} . 该研究策略为非手性的荧光分子构建 CPL 体系及动态调控提供了策略.

关键词 手性组装; 超分子; 光控; 圆偏振发光(CPL)

Circularly Polarized Luminescence and Dynamic Regulation Based on the co-Assembly of *L/D*-Lysine Hydrochloride and Photoactivated AIE Molecules

Feng, Xicheng^a Zhu, Liangliang^b Yue, Bingbing^{*a}

(^a School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(^b State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers,
Department of Macromolecular Science, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract In recent years, chiral materials based on circularly polarized luminescence (CPL) generated by molecular assembly have developed rapidly. However, the overall CPL signal of organic material systems is still weak and lacks precise modulation means. As a non-contact external stimulus, light stimulation has the advantages of precision and speed. Therefore, in this work, hexathiobenzene (M-1) with photoactive aggregation-induced emission (AIE) properties were used as fluorescent dyes, and chiral amino acids *L/D*-Lysine hydrochloride (*L/D*-Lys) were used as chiral templates. Supramolecular *L/D*-Lys@M-1 components are formed by intermolecular hydrogen bonding in a mixed solvent (*N,N*-dimethylformamide (DMF)/H₂O). Specifically, 1 mmol/L M-1 and 6 mmol/L *L/D*-Lys were dissolved in 700 μ L DMF. Next, add 300 μ L ultra-pure water to the mixture at 60 $^{\circ}$ C and cool the solution to 25 $^{\circ}$ C. Due to the formation of *L/D*-Lys@M-1 co-assembly, the transparent solution gradually becomes an opaque suspension. The photoluminescence spectra, UV absorption spectra and DLS (dynamic light scattering) were used to characterize the structure and photoluminescence properties of the photoluminescence components. It was found that *L/D*-Lys@M-1 had self-aggregation effect under the photoluminescence, its particle size increased from ca. 700 nm to ca. 1400 nm, and it produced continuously enhanced emission at 450 nm and 550 nm. The chiral properties of ground state and excited state were studied by CD (circular dichroism) and CPL. The Cotton effect was observed at 250 nm and 300 nm under solvent-induced and light-controlled conditions, and the CD intensity of the *L/D*-Lys@M-1 co-assembly system increased with prolonged illumination time, indicating that the co-assembly system realized chiral transfer and amplification. CPL spectra indicate that, under the solvent effect of poor solvent H₂O, the co-assembly induced CPL signal at 540 nm (M-1 molecule fluorescence emission), luminescent dissymmetry factor ($|g_{lum}|$) 0.3×10^{-2} . This study provides a strategy for CPL construction and dynamic regulation of achiral fluorescence molecules.

Keywords chiral assembly; supramolecular; photocontrol; circularly polarized luminescence (CPL)

* E-mail: yuebingbing@usst.edu.cn

Received January 10, 2022; published March 9, 2022.

Supporting information for this article is available free of charge via the Internet at <http://sioc-journal.cn>.

Project supported by the Shanghai Sailing Program (No. 20YF1432400) and partially from the National Natural Science Foundation of China (No. 22105128).
项目受上海市科技创新行动计划扬帆项目(No. 20YF1432400)和国家自然科学基金(No. 22105128)资助.

1 引言

手性这一概念首次由凯尔文于 1893 年提出,其指的是镜像上无法重叠的几何结构.随着时代的发展,人们对于手性的研究越发深入,越发认识到手性对于研究生命过程的重要意义^[1-4].与此同时,人们发现发光对映体所产生的左右偏振光是不同的,于是提出了圆偏振发光(CPL)这一概念表述这一现象^[5].一般用不对称因子(g_{lum})来量化 CPL 强弱,不对称因子可以由公式 $g_{lum} = 2(I_L - I_R)/(I_L + I_R)$ 计算得出,其中 I_L 和 I_R 分别表示左右 CPL 的荧光强度.正是由于 CPL 在激发态所表现出的手性光学性质,使得其在生物成像^[6]、信息安全^[7]、智能传感器^[8]等领域拥有广阔的运用前景.一般而言, CPL 材料都需要具有两个基本单元,即手性结构和发光结构.然而聚集诱导猝灭效应一直影响着发光材料在聚集状态的荧光强度,同时也制约了 CPL 材料的发展.直到 2001 年唐本忠等^[9]提出了聚集诱导发光(AIE)概念,为 CPL 材料带了转机.目前对于诱导非手性的 AIE 分子产生手性的研究已经较为成熟,包括化学键链接手性分子和 AIE 分子^[10-12],利用手性模板法^[13-15]等.然而相较于此类方法,利用超分子作用构建 CPL 体系无疑更加灵活和简洁^[16-18],这是由于超分子作用依靠的不是化学键,而是依靠静电作用、金属原子配位体间的配位键、氢键、 $\pi-\pi$ 堆积作用等^[19-22].不同于化学键强大的键能,非共价键较弱的相互作用使得其处于动力学亚稳态^[23],这赋予了超分子体系可逆性、适应性、自愈性和刺激响应性等^[24].

多硫苯基化合物(M-1, 合成路线如图 S1 和 S2 所示)在 S 元素的重原子效应下产生系统间窜越(ISC),使其可以产生磷光发射,如图 1a 所示.同时, M-1 在光照作用

下会发生构象变化,使其具有动态变化的亲疏水性,如图 1b 所示. M-1 分子在光照作用下由亲水性变为疏水性,进而产生分子聚集.而聚集又抑制了非辐射跃迁,进一步加强了磷光发射.因为 M-1 分子具有自聚集和荧光增强特性^[25-27],使得其有望成为新一代聚集诱导磷光(AIP)分子,并具有构筑新型光控开关的潜力.

本工作以手性氨基酸 L/D-赖氨酸盐酸盐(L/D-Lys)为手性模板,以 M-1 为荧光染料,通过分子间氢键作用形成超分子 L/D-Lys@M-1.实验发现,在 L/D-Lys@M-1 溶解良好的 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)溶液中加入一定比例不良溶剂水,超分子会因为不良溶剂的溶剂作用,共组装形成花簇状的聚集体.使用 CD 光谱(圆二色谱)研究 L/D-Lys@M-1 共组装体的手性结构,发现原本非手性的 M-1 分子在其吸收峰处(300 nm)产生了 Cotton 效应,说明在组装体中发生了手性传递.且当水的体积分数 $\phi_{H_2O} = 30\%$ 时,手性传递具有最佳的放大效应.此外,该体系在紫外光照射下表现出荧光发射和 CD 信号增强现象. CPL 光谱结果显示,组装体在 540 nm (对应 M-1 的发射峰)处产生了信号,同样证实了在 L/D-Lys@M-1 共组装体中,非手性的 M-1 分子被手性 L/D-Lys 诱导形成了手性排列,如图 1c 所示.

2 结果与讨论

2.1 L/D-Lys@M-1 的合成与分析

L/D-Lys@M-1 的合成:将 1 mmol/L M-1 和 6 mmol/L L/D-Lys·HCl 溶解在 700 μ L 的 DMF 中(图 S3 的滴定实验表明,当 L-Lys 中添加 M-1 时, $-NH_2$ 的化学位移产生变化,且随着 M-1 比例增加而增加,直到 $n_{L/D-Lys \cdot HCl} : n_{M-1} = 6 : 1$ 时达到最大,因此认为

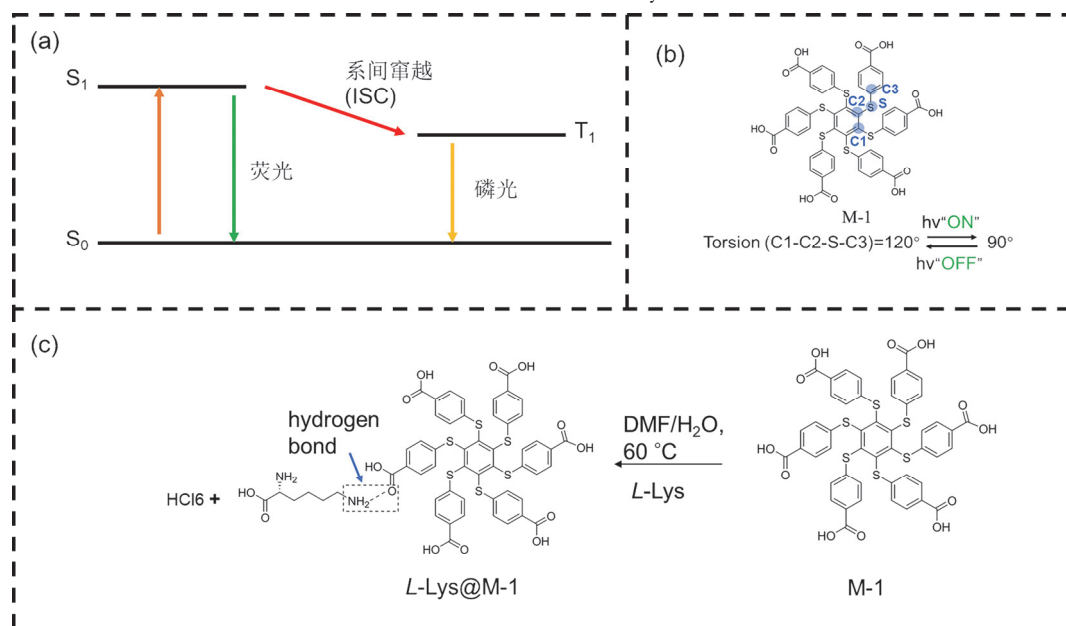


图 1 M-1 和 L-Lys@M-1 的合成路线
Figure 1 Synthesis of M-1 and L-Lys@M-1

$n_{L/D-Lys \cdot HCl} : n_{M-1} = 6 : 1$ 为最佳比例), 然后溶液加热到 60 °C, 滴加 300 μ L 超纯水, 等待溶液自然冷却至室温 (25 °C), 超分子 $L/D-Lys@M-1$ 共组装体制备完成(本工作所有实验, 如果没有特殊说明, $L/D-Lys@M-1$ 全都是在 $n_{L/D-Lys \cdot HCl} : n_{M-1} = 6 : 1$, 溶解在 $\phi_{H_2O} = 30\%$ 这一条件下制备而成).

$L/D-Lys@M-1$ 的分析: 红外谱图(FT-IR)可以反映超分子 $L/D-Lys@M-1$ 共组装的驱动力. 如图 2 所示, 位于 1694 cm^{-1} 吸收峰是 M-1 中 $-C=O$ 伸缩振动所产生的, 而 1502 cm^{-1} 的吸收峰是由于 $L-Lys \cdot HCl$ 中的一 NH_2 的振动所形成的. 然而, M-1 和 $L-Lys \cdot HCl$ 的特征峰在共组装时都会发现存在着轻微的偏移, 即 M-1 的 $-C=O$ 振动峰从 1694 cm^{-1} 偏移到 1689 cm^{-1} , $L-Lys \cdot HCl$ 的

$-NH_2$ 振动峰从 1502 cm^{-1} 偏移到 1495 cm^{-1} , 这是典型的分子间氢键作用. 红外谱图表明, $L-Lys@M-1$ 是在氢键作用下, 形成了超分子共组装体.

2.2 光激发诱导分子聚集

如图 3a 所示, 光致发光曲线表明 $L-Lys@M-1$ 在 $\phi_{H_2O} = 30\%$ 的混合溶剂体系中表现出 430 nm 和 540 nm 的双发射现象. 而且其发射强度呈现出光致诱导增强的现象. 当未施加光照时, 其发射强度较弱, 当给予其持续 90 s 的 365 nm 光照之后, $L-Lys@M-1$ 的发光强度明显增强. 在光照了 90 s 后发射强度达到最高, 与初始值相比, 增强了 109%. 化合物 M-1, $L-Lys@M-1$ 和光照 90 s 后的 $L-Lys@M-1$ 量子产率分别为 $<0.1\%$, 0.6% 和 1.1%. 紫外吸收光谱和动态光散射(DLS)表明了发射增强的原因. 图 3b 中 $L-Lys@M-1$ 的紫外吸收光谱显示, 位于 250 nm 和 300 nm 波长的两个吸收峰, 分别对应赖氨酸盐酸盐和 M-1 的紫外吸收. 当对 $L-Lys@M-1$ 施加持续性 365 nm 光照时, 可以发现吸收光谱强度随着光照时间的延长而增加, 这无疑表明 $L-Lys@M-1$ 在光照过程中产生了聚集. 图 3c 的 DLS 表明, $L-Lys@M-1$ 在光照前后其粒径从约 700 nm 增大到约 1400 nm, 表明 $L-Lys@M-1$ 光照后产生了聚集, 聚集体的产生阻止了非辐射跃迁, 致使荧光发射增强. 因此可以得出结论, $L-Lys@M-1$ 具备光照诱导聚集的特性. 图 3d 和图 S4 表明, $L-Lys@M-1$ 在 540 nm 处的发射具备 10.12 μ s 的长寿命, 这表明其具备聚集诱导磷光发射(AIP)增强特性. 且寿命随着光照时间延长而增加. 而 430 nm 处的发射则属于荧光发射(寿命 $< ns$).

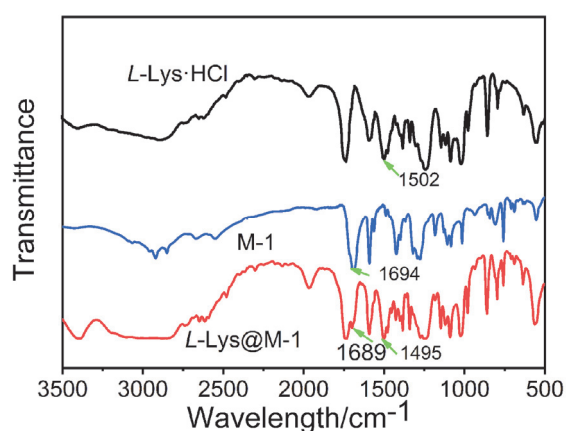


图 2 $L-Lys \cdot HCl$, M-1 和 $L-Lys@M-1$ 的红外谱图
Figure 2 FT-IR spectra of $L-Lys \cdot HCl$, M-1 and $L-Lys@M-1$

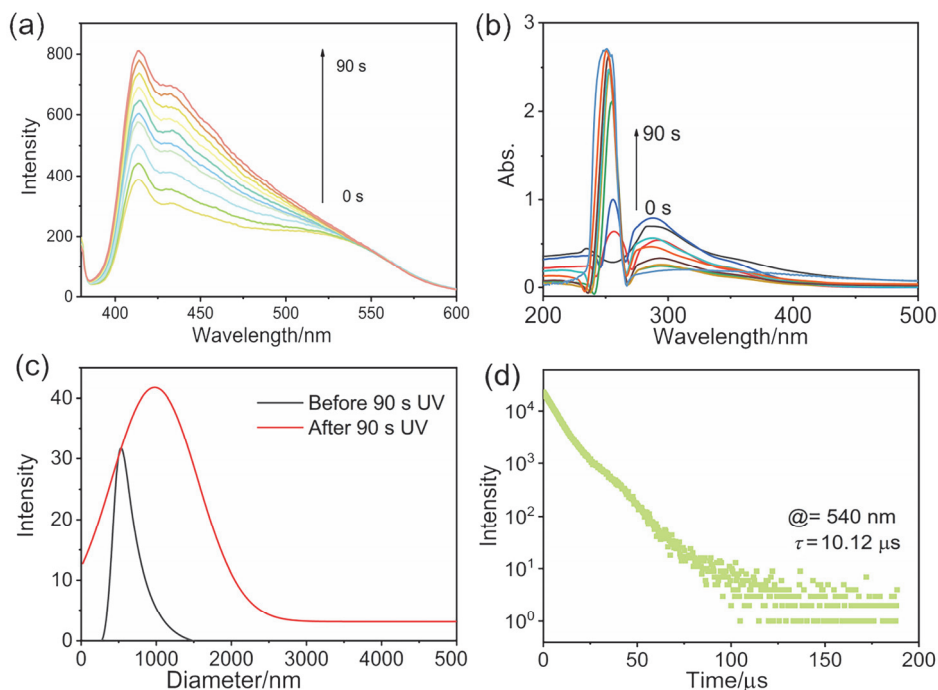


图 3 $L-Lys@M-1$ 的(a)持续光照下荧光光谱, (b)持续光照下紫外吸收光谱, (c)持续光照下 DLS 和(d)荧光寿命光谱($\lambda_{ex} = 365$ nm)
Figure 3 (a) Fluorescence spectra under continuous illumination, (b) UV-Vis spectra under continuous illumination, (c) DLS under continuous illumination and (d) fluorescence lifetime of $L-Lys@M-1$ ($\lambda_{ex} = 365$ nm)

2.3 溶剂作用和光激发调控圆二色(CD)光谱

利用 CD 光谱, 可以验证 *L/D*-赖氨酸盐酸盐固有的分子手性是否转移到 *L/D*-Lys@M-1 组装体上, 并且探究溶剂作用和光激发对 CD 的影响. 如图 S5 所示, *L/D*-Lys@M-1 在含水量不同的 DMF/H₂O 的混合溶液中表现出不同的光物理性质. M-1 和 *L*-Lys 因为极性不同, 吸收强度与 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ 的关系表现出相反变化趋势. 即溶剂效应将影响超分子的结构与性质. 如图 4a 所示, 实验发现, 当添加不良溶剂 H₂O 时, 在 300 nm (对应着 M-1 的吸收峰) 出现新的 Cotton 效应, 且在 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30% 时, 产生最大的 CD 信号. CD 图谱表明, 在氢键和溶剂效应共同作用下, 在 *L/D*-Lys@M-1 共组装体中, *L/D*-Lys·HCl 的固有手性转移到 *L/D*-Lys@M-1 上并产生手性放大. 对 *L/D*-Lys@M-1 进行光激发, 如图 4b, 随着光照时间的延长, *L/D*-Lys@M-1 在 230 nm 和 300 nm 的 CD 强度都随之增强, 这表明光激发对 *L/D*-Lys@M-1 的手性传递也具有放大作用.

为了进一步研究超分子 *L/D*-Lys@M-1 的 CD 与溶剂以及光照之间的关系. 使用扫描电子显微镜(SEM)研究了不同环境下超分子的形貌. 如图 5 和图 S6 所示, 当 *L*-Lys@M-1 溶解在纯良溶剂 DMF 中时, 仅仅表现出简单的分子堆积, 并无特定的形貌, 表示此时并没有发生手性传递, *L*-Lys@M-1 仅在 230 nm (*L*-Lys·HCl 的吸收

峰)处表现出 CD 信号. 当 *L*-Lys@M-1 中加入不良溶剂水时, 其组装形貌发生了明显的改变, 由原来的无定型转变成了花簇状的聚集体, CD 光谱在 300 nm 处出现了新的 Cotton 峰, 表明手性传递已经在超分子中发生. 继续施加持续 90 s 的 365 nm 光照, 可以发现花簇状的聚集体的“花瓣”发生了形变, 花瓣尖由原先的矩形变成尖形, 表示着手性传递的放大, 对应着 230 nm 和 300 nm 处的 CD 信号都发生了增强. X 射线衍射(XRD)图(图 S7)表明, 当 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =0% 时, 超分子 *L*-Lys@M-1 并无明显的衍射峰, 说明此时的超分子仅仅是无序堆叠, 当 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30% 时, $2\theta=28.44^\circ$, 说明超分子产生了 π - π 堆叠, 当对 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30% 的超分子进行 90 s 的光照处理后, $2\theta=28.38^\circ$, 表明共组装结构在光照下产生变化.

2.4 聚集诱导 CPL

L/D-Lys@M-1 的基态信息可以通过 CD 光谱了解, 但是为了进一步研究其激发态信息, 需要借助 CPL 光谱. 图 6 清晰地表明, 当 *L/D*-Lys@M-1 溶解在纯溶剂 DMF 中时, 观察不到明显的 CPL 和 g_{lum} 信号. 当将 *L/D*-Lys@M-1 溶解在 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30% 的混合溶剂时, 在 540 nm 位置产生了成镜面对称的 CPL 信息, 其 $|g_{\text{lum}}|=0.003$, 这对应 M-1 分子的磷光发射峰, 表明在溶剂作用下, *L/D*-Lys@M-1 在共组装过程中, *L/D*-Lys·HCl 诱导 M-1 分子产生的手性堆叠.

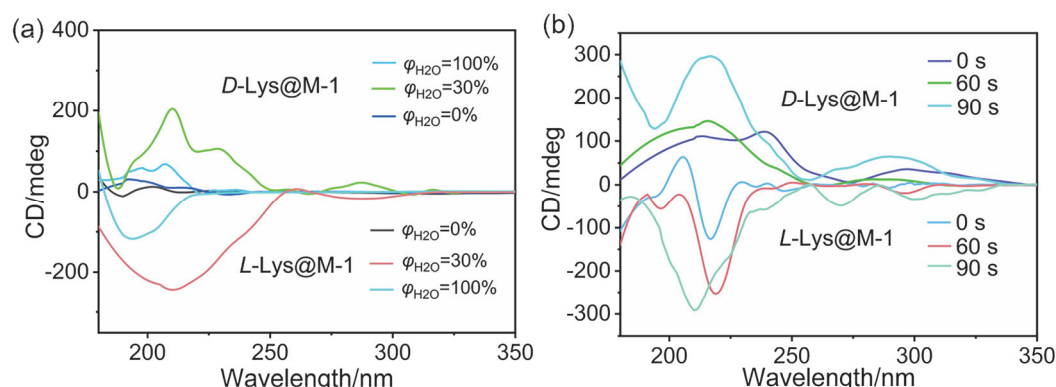


图 4 (a)含水量和(b)光照对 *L/D*-Lys@M-1 的 CD 的影响

Figure 4 Effects of (a) water content and (b) UV on CD spectra of *L/D*-Lys@M-1

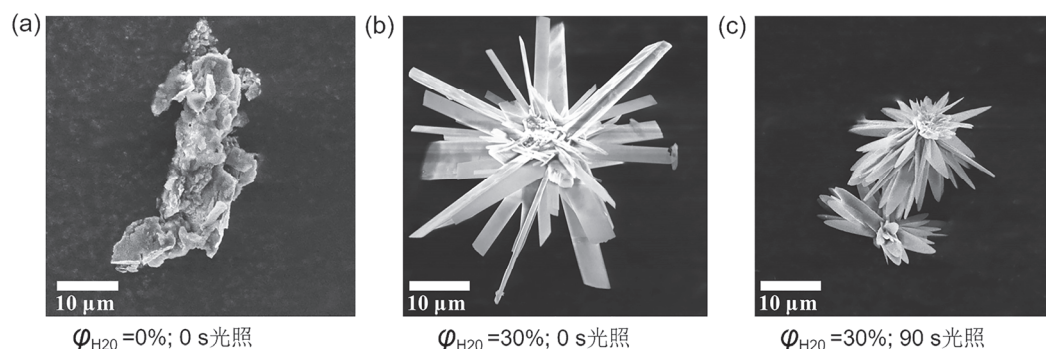


图 5 (a) *L*-Lys@M-1 在纯 DMF 中的 SEM 图像, (b) *L*-Lys@M-1 在 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30% 混合溶剂中未受到光照时的 SEM 图像和 (c) *L*-Lys@M-1 在 $\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30% 混合溶剂中受到 90 s 光照时的 SEM 图像

Figure 5 SEM images of *L*-Lys@M-1 in (a) pure DMF, (b) mixed solvent ($\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30%) without UV and (c) mixed solvent ($\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ =30%) with 90 s UV

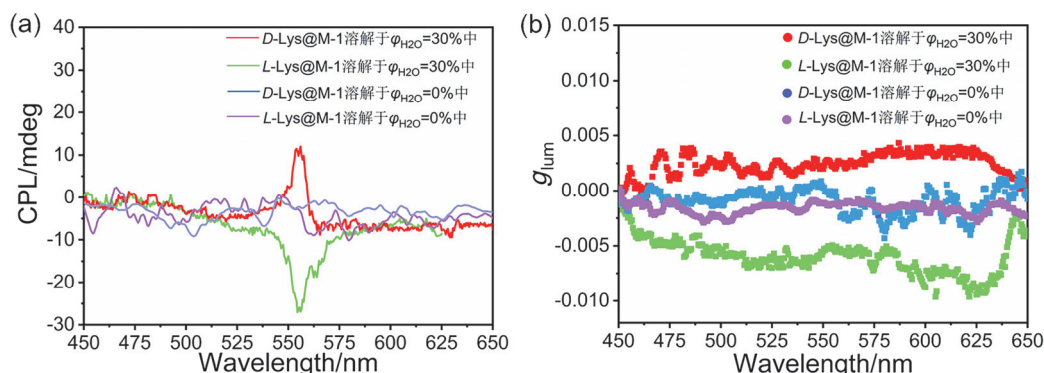


图6 L/D -Lys@M-1 在纯溶剂 DMF 和混合溶剂 DMF/H₂O 中的(a) CPL 光谱和(b) g_{lum}
Figure 6 (a) The CPL spectra and (b) g_{lum} of L/D -Lys@M-1 in pure solvent DMF and mixed solvent DMF/H₂O

3 结论

综上所述,提出了一种新型的构建 CPL 体系的策略。通过氢键作用,具备光刺激响应性的 M-1 分子与手性氨基酸分子 L/D -Lys·HCl 形成超分子 L/D -Lys@M-1,并在加入不良溶剂 H₂O 后,超分子 L/D -Lys@M-1 共组装形成了手性结构,诱导非手性的 M-1 分子产生 CPL 信号,具有约为 0.003 的 $|g_{lum}|$ 值。同时通过对超分子体系进行连续紫外照射实验,证实了光激发诱导了分子聚集和荧光发射增强,同时验证了 L/D -Lys@M-1 具有光照诱导手性增强的特性。这种光刺激响应性的特性为 CPL 材料的功能化应用提供了新思路。

4 实验部分

M-1 的合成: 根据之前论文^[25],在氩气气氛保护下,将六氟苯(2 mmol)、干燥的 K₂CO₃ (18 mmol)和 4-巯基苯甲酸乙酯(36 mmol)溶解到 DMF 溶剂中,随后将混合溶剂加入到圆底烧瓶中。60 °C 反应 40 h。反应结束后向烧瓶中倒入 400 mL 超纯水,出现黄色沉淀物。过滤收集固体后,用乙醇、乙醚漂洗干燥。得到淡黄色固体产物 **1**,产率 52%,¹H NMR (DMSO-*d*₆, 400 MHz, 298 K) δ : 1.32 (t, $J=7.1$ Hz, 18H), 4.26~4.28 (m, 12H), 7.12~7.14 (m, 12H), 7.77~7.80 (m, 12H)。将化合物 **1** 溶于四氢呋喃(THF)中,加入 NaOH 水溶液。在 50 °C 下反应 10 h,然后加入 HCl 溶液。收集固体,用水、EA、乙醇洗涤得到黄色粉末 M-1,产率 35%,¹H NMR (DMSO-*d*₆, 400 MHz, 298 K) δ : 7.12~7.14 (m, 12H), 7.78~7.80 (m, 12H), 12.85 (s, 6H), 如图 S2 所示。

致谢

感谢华东理工大学马骥教授课题组提供 CPL 测试。

References

- Addadi, L.; Weiner, S. *Nature* **2001**, *411*, 753.
- Gan, Q.; Wang, X.; Kauffmann, B.; Rosu, F.; Ferrand, Y.; Huc, I. *Nat. Nanotechnol.* **2017**, *12*, 447.
- Ren, J.; Hu, Y.; Lu, C.-H.; Guo, W.; Aleman-Garcia, M. A.; Ricci, F.; Willner, I. *Chem. Sci.* **2015**, *6*, 4190.
- Chen, Z.; Han, Z.; Shi, W.; Cheng, P. *Acta Chim. Sinica* **2020**, *78*, 1336 (in Chinese). (陈中杭, 韩宗魁, 师唯, 程鹏, 化学学报, **2020**, *78*, 1336.)
- Zhang, L.; Zhao, W.-L.; Li, M.; Lu, H.-Y.; Chen, C.-F. *Acta Chim. Sinica* **2020**, *78*, 1030 (in Chinese). (张亮, 赵文龙, 李猛, 吕海燕, 陈传峰, 化学学报, **2020**, *78*, 1030.)
- Zhang, G.; Palmer, G. M.; Dewhurst, M.; Fraser, C. L. *Nat. Mater.* **2009**, *8*, 747.
- Xu, M.; Ma, C.; Zhou, J.; Liu, Y.; Wu, X.; Luo, S.; Li, W.; Yu, H.; Wang, Y.; Chen, Z.; Li, J.; Liu, S. *J. Mater. Chem. C* **2019**, *7*, 13794.
- Gu, L.; Shi, H.; Gu, M.; Ling, K.; Ma, H.; Cai, S.; Song, L.; Ma, C.; Li, H.; Xing, G.; Hang, X.; Li, J.; Gao, Y.; Yao, W.; Shuai, Z.; An, Z.; Liu, X.; Huang, W. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 8425.
- Luo, J. D.; Xie, Z. L.; Lam, J. W. Y.; Cheng, L.; Chen, H. Y.; Qiu, C. F.; Kwok, H. S.; Zhan, X. W.; Liu, Y. Q.; Zhu, D. B.; Tang, B. Z. *Chem. Commun.* **2001**, (18), 1740.
- Hu, M.; Ye, F.-Y.; Du, C.; Wang, W.; Yu, W.; Liu, M.; Zheng, Y.-S. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, 1.
- Yuan, Y.-X.; Hu, M.; Zhang, K.-R.; Zhou, T.-T.; Wang, S.; Liu, M.; Zheng, Y.-S. *Mater. Horizons* **2020**, *7*, 3209.
- Liang, Z.-P.; Tang, R.; Qiu, Y.-C.; Wang, Y.; Lu, H.; Wu, Z.-G. *Acta Chim. Sinica* **2021**, *79*, 1401 (in Chinese). (梁志鹏, 唐瑞, 邱雨晨, 王阳, 陆洪彬, 吴正光, 化学学报, **2021**, *79*, 1401.)
- Bockova, J.; Jones, N. C.; Meierhenrich, U. J.; Hoffmann, S. V.; Meinert, C. *Commun. Chem.* **2021**, *4*, 1.
- Xu, M.; Wu, X.; Yang, Y.; Ma, C.; Li, W.; Yu, H.; Chen, Z.; Li, J.; Zhang, K.; Liu, S. *ACS Nano* **2020**, *14*, 11130.
- Hu, M.; Ye, F.-Y.; Du, C.; Wang, W.; Zhou, T.-T.; Gao, M.-L.; Liu, M.; Zheng, Y.-S. *ACS Nano* **2021**, *15*, 16673.
- Yan, N.; Zhu, Y.; Jiang, W. *Chem. Commun.* **2018**, *54*, 13183.
- Wu, T.; Jiang, Z.; Xue, X.; Wang, S.-C.; Chen, M.; Wang, J.; Liu, H.; Yan, J.; Chan, Y.-T.; Wang, P. *Chin. Chem. Lett.* **2021**, *32*, 1911.
- Song, L.; Zhou, Y.; Gao, T.; Yan, P.; Li, H. *Acta Chim. Sinica* **2021**, *79*, 1042. (宋龙飞, 周妍妍, 高婷, 闫鹏飞, 李洪峰, 化学学报, **2021**, *79*, 1042.)
- Qin, B.; Yin, Z. H.; Tang, X. Y.; Zhang, S.; Wu, Y. H.; Xu, J. F.; Zhang, X. *Prog. Polym. Sci.* **2020**, *100*, 18.
- Tantakitti, F.; Boekhoven, J.; Wang, X.; Kazantsev, R. V.; Yu, T.; Li, J. H.; Zhuang, E.; Zandi, R.; Ortony, J. H.; Newcomb, C. J.; Palmer, L. C.; Shekhawat, G. S.; de la Cruz, M. O.; Schatz, G. C.; Stupp, S. I. *Nat. Mater.* **2016**, *15*, 469.
- Aida, T.; Meijer, E. W.; Stupp, S. I. *Science* **2012**, *335*, 813.
- Li, M.; Lin, W.-B.; Fang, L.; Chen, C.-F. *Acta Chim. Sinica* **2017**, *75*, 1150 (in Chinese). (李猛, 林伟彬, 房蕾, 陈传峰, 化学学报, **2017**, *75*, 1150.)
- Baker, N. A.; Sept, D.; Joseph, S.; Holst, M. J.; McCammon, J. A. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2001**, *98*, 10037.
- Folmer, B. J. B.; Sijbesma, R. P.; Versteegen, R. M.; van der Rijt, J. A. J.; Meijer, E. W. *Adv. Mater.* **2000**, *12*, 874.
- Jia, X.; Shao, C.; Bai, X.; Zhou, Q.; Wu, B.; Wang, L.; Yue, B.; Zhu, H.; Zhu, L. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2019**, *116*, 4816.
- Gu, J.; Yue, B.; Baryshnikov, G. V.; Li, Z.; Zhang, M.; Shen, S.; Agren, H.; Zhu, L. *Research* **2021**, *2021*, 11.
- Zhou, L.-L.; Wu, B.; Li, A.-Z.; Luo, M.-K.; Zhu, L.-L. *Chin. J. Lumin.* **2021**, *42*, 296 (in Chinese). (周璐璐, 吴斌, 李安泽, 罗梦恺, 朱亮亮, 发光学报, **2021**, *42*, 296.)

(Cheng, B.)