

## 四苯乙烯手性组装体系的圆偏振发光与调控研究进展

贾文萱<sup>1</sup>, 贾鸿哲<sup>1</sup>, 徐立进<sup>1</sup>, 欧阳光辉<sup>1\*</sup>

(中国人民大学 化学与生命资源学院, 北京 海淀区 100872)

**摘要:** 圆偏振发光材料因其在下一代显示技术、信息加密、手性传感与识别等领域的应用前景而受到广泛关注。然而,传统发光材料在固态或聚集状态下常因聚集诱导猝灭效应而导致发光效率下降,限制了其实际应用,聚集诱导发光现象的发现为解决这一问题提供了新思路。四苯乙烯基元因其结构易于修饰、固态发光效率高、聚集行为可控等优点,成为构建高性能圆偏振发光材料的理想平台。本文总结了四苯乙烯圆偏振发光材料在手性组装策略、聚集态手性放大机制、性能调控手段及应用探索等方面的最新研究进展。

**关键词:** 四苯乙烯; 圆偏振发光; 聚集诱导发光; 超分子手性; 超分子组装

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260117

CSTR: 32170.14.CJL.20260117

### Research progress on circularly polarized luminescence and regulation of tetraphenylethene chiral assembly system

JIA Wenxuan<sup>1</sup>, JIA Hongzhe<sup>1</sup>, XU Lijin<sup>1</sup>, OUYANG Guanghui<sup>1\*</sup>

(School of Chemistry and Life Resources, Renmin University of China, Haidian District, Beijing, 100872)

\* Corresponding Author, E-mail: ouyanggh@ruc.edu.cn

**Abstract:** Circularly polarized luminescent materials have garnered significant attention due to their broad application prospects in next-generation display technologies, information encryption, chiral sensing, and recognition. However, conventional luminescent materials often suffer from reduced emission efficiency in the solid or aggregated state due to aggregation-caused quenching, which limits their practical applications. The discovery of aggregation-induced emission offers a new strategy to overcome this challenge. The tetraphenylethene motif, with its ease of structural modification, high solid-state emission efficiency, and controllable aggregation behavior, serves as an ideal platform for constructing high-performance circularly polarized luminescent materials. This article systematically reviews recent research progress on tetraphenylethene-based circularly polarized luminescent materials, focusing on chiral assembly strategies, mechanisms of chirality amplification in the aggregated state, performance regulation methods, and explorations of practical applications.

**Keywords:** Tetraphenylethylene; circularly polarized luminescence; aggregation-induced luminescence; supramolecular chirality; supramolecular assembly

## 1 引 言

圆偏振发光 (Circularly Polarized Luminescence, CPL) 材料能够发射具有差异的左旋和右旋圆偏振光,在圆偏振发光器件、手性传感与识别、

智能响应光学材料、光学信息安全与防伪等前沿领域展现出广阔的应用前景,是当前发光领域研究的热点之一。评价 CPL 材料性能的核心参数是发光不对称因子( $g_{lum}$ )和光致发光量子产率( $\Phi$ )。 $g_{lum}$ 直接表征材料发射圆偏振光的手性强度,理论

最大值为 $\pm 2$ ,是区分材料偏振能力的关键指标;而 $\Phi$ 反映吸收能量转化为发光的效率,决定材料实际亮度,二者共同构成评价CPL材料综合性能的基础。

$\pi$ -共轭发光分子在稀溶液中可能具有较高的发光效率,但在聚集态或固态下,由于分子间的强 $\pi$ - $\pi$ 堆积作用,容易发生聚集导致荧光猝灭(Aggregation-Caused Quenching, ACQ)效应,严重限制了其固态CPL性能的发挥<sup>[1,2]</sup>。聚集诱导发光(Aggregation-Induced Emission, AIE)现象的发现为解决上述难题提供了全新的思路。与ACQ分子相反,AIE分子在稀溶液中几乎不发光,但在聚集态或固态下由于分子内运动受限,非辐射跃迁被有效抑制,从而发射出强荧光<sup>[3]</sup>。四苯乙烯(Tetraphenylethylene, TPE)作为最经典的AIE“明星”分子,其螺旋桨式的非平面构型使其在聚集态下能够有效避免紧密 $\pi$ - $\pi$ 堆积,同时合成方法相对简单,易于通过多种化学反应进行功能化修饰。这些特点使TPE成为构建新型发光材料的理想

平台<sup>[4-7]</sup>。

将TPE的AIE特性与手性元素相结合,被认为是突破固态CPL材料性能瓶颈的有效策略之一。通过合理的分子设计引入手性,可以在实现高发光效率的同时诱导产生CPL信号。目前,基于TPE的CPL材料研究已取得长足进展,研究者发展了多种构筑策略<sup>[8]</sup>,包括手性TPE分子的多级次组装以及非手性TPE发色团与手性分子共组装等。本文旨在系统综述基于四苯乙烯组装体的圆偏振发光材料的最新研究进展。系统梳理TPE基CPL材料的构筑策略(图1),重点阐述了共价修饰、超分子组装以及非手性体系的手性组装等主要途径,在此基础上,进一步分析了聚集态对CPL信号的放大与调控机制,以及该类材料在圆偏振发光器件、手性传感与识别、智能响应光学材料、光学信息安全与防伪等领域的应用探索。最后,对当前研究存在的问题与挑战进行分析,并对未来发展方向进行展望,以期为新型高效CPL材料的设计与开发提供有益参考。

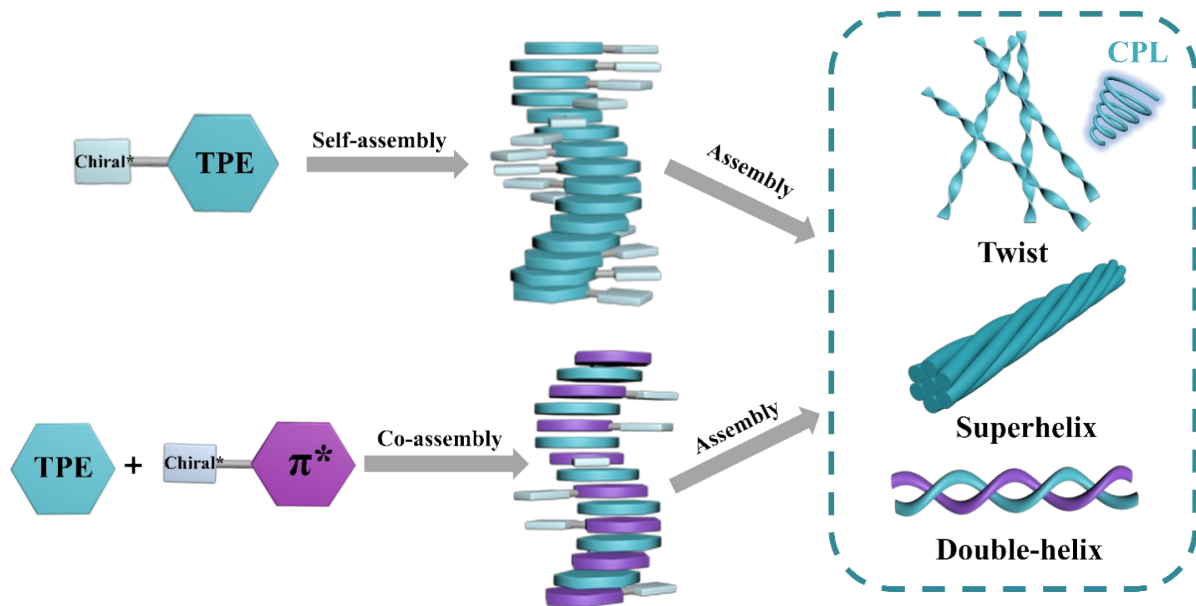


图1 手性TPE分子自组装以及非手性TPE与手性分子共组装创制圆偏振发光材料

Fig. 1 Self-assembly of chiral TPE molecules and co-assembly of achiral TPE with chiral molecules to create circularly polarized luminescent materials

## 2 手性TPE分子自组装及CPL性能

将手性基元通过共价键直接连接至TPE骨架,是构建手性TPE-CPL材料最常见的策略。手性源可以是单个或多个点手性中心(如氨基酸、环己二胺、糖类),也可以是具有轴手性或面手性的

单元。研究表明,手性中心的构型、数目以及连接方式,不仅决定了分子层面的手性,更通过影响分子间堆积模式,从而调控聚集态的超分子手性和CPL性能。该策略的核心优势为手性引入精准、分子结构稳定,可实现从分子手性到超分子手性的定向传递。

## 2.1 TPE-氨基酸类手性组装体系

氨基酸作为天然手性源,具有结构多样、生物相容性好的显著优势,将其通过共价键连接至TPE骨架,是目前TPE共价连接手性基团策略中最常用的路径之一。该策略可直接向TPE分子引入手性中心,同时借助氨基酸分子中的氨基、羧基等官能团调控分子间相互作用,进而优化TPE材料的聚集态行为与CPL性能,为手性超分子材料的结构与性能调控提供了便捷且高效的思路。

在氨基酸修饰TPE的研究中,不同氨基酸单元的引入会显著调控材料的组装行为与光学性能。丙氨酸作为常见的手性氨基酸,其修饰的TPE衍生物在组装行为调控与手性传递方面展现出独特优势。Liu等将丙氨酸共价连接至TPE骨架,制备出TPE基手性聚三唑(P(TPE-alanine)),在THF/H<sub>2</sub>O混合体系中可通过调控水的比例和聚合物浓度,实现自组装形貌从囊泡、“珍珠项链”状结构向螺旋纳米纤维、微纤维的

可控转变,高浓度下还可形成网络状聚集体<sup>[9]</sup>(图2(a))。Goskulwad等以丙氨酸为间隔基,将TPE与萘二甲酰亚胺(NDI)共价连接,合成了NDI-(L-Ala-TPE)<sub>2</sub>和NDI-(D-Ala-TPE)<sub>2</sub>两种立体异构体,研究发现在THF/H<sub>2</sub>O(40:60)混合体系中,L-丙氨酸修饰的分子自组装形成左手(M型)螺旋,D-丙氨酸修饰的分子则形成右手(P型)螺旋,两种螺旋结构具有规整的尺寸特征;当水体积分数提升至80%时,二者均转变为纳米球形聚集体。丙氨酸的手性可传递至超分子层次,且氨基酸间隔基的手性构型对超分子螺旋手性具有调控作用<sup>[10]</sup>。此外,Chu等通过酰胺键与丝氨酸(Ser)、天冬氨酸(Asp)共价连接,制备出两种单一氨基酸修饰的TPE共轭物(TPE-Ser、TPE-Asp),进一步拓展了TPE-氨基酸体系的自组装功能与应用场景。在水溶液中可自组装形成超分子水凝胶,两种水凝胶均呈现尺寸和形状随机的纳米片形貌,具有良好的稳定性,且具有明显的pH依赖性<sup>[11]</sup>。

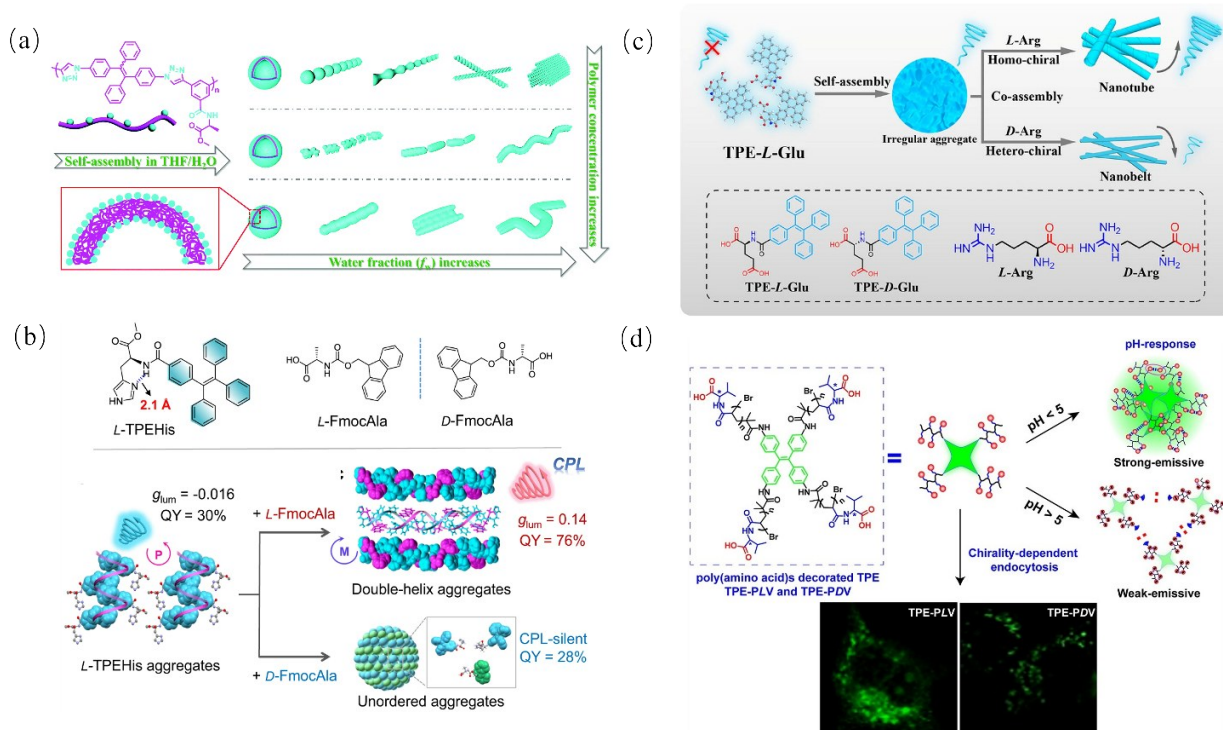


图2 (a)TPE-丙氨酸聚合物组装实现形貌的可控转变;(b)TPE-组氨酸与FmocAla对映选择性组装实现CPL信号放大;(c)TPE-谷氨酸与精氨酸共组装实现CPL信号放大;(d)TPE为核心,聚缬氨酸为侧臂的两种星型共轭物均具有典型的AIE特性及pH响应性。

Fig. 2 (a) The controllable morphological transformation of TPE-alanine assemblies; (b) Enantioselective assembly of TPE-histidine with FmocAla enabling amplification of CPL signals; (c) Co-assembly of TPE-glutamic acid with arginine achieving amplification of CPL signals; (d) Two star-shaped conjugates with TPE as the core and polyvaline as side arms exhibit typical AIE characteristics and pH responsiveness.

除单一氨基酸外,多肽及氨基酸衍生手性侧链的引入,进一步为TPE-氨基酸体系CPL的放大、动态调控及生物相容性优化提供了新路径。Wang等以谷氨酸为手性单元,合成了TPE修饰的谷氨酸基N-羧基环内酸酐(TPELG-NCA),以PEG-PBLG为大分子引发剂,制备出两亲性三嵌段多肽PEG-PBLG-PTPELG,在H<sub>2</sub>O/DMF混合体系中可自组装形成直径约70 nm的胶束,依托胶束核心中TPE基团展现出典型的AIE特性<sup>[12]</sup>。Berra等进一步将TPE连接到具有不同手性组合的二肽(Ala-Phe)上,通过调控二肽的手性构型,发现异手性体系能形成更有序的J-聚集体,产生双信号诱导圆二色性(CD)信号,CPL的 $g_{lum}$ 值可达 $7.5 (\pm 0.04) \times 10^{-3}$ ,比同手性分子CPL的 $g_{lum}$ 值高出约8倍,揭示了手性中心间相互作用对性能的显著放大效应<sup>[13]</sup>。

Wang等将L-组氨酸(L-His)共价连接至TPE骨架,制备出L-TPEHis衍生物,该衍生物在THF/H<sub>2</sub>O(10:90)混合体系中可自组装形成单螺旋TPE聚集体,且呈现明显CPL信号,当L-TPEHis与L-FmocAla进行对映选择性共组装时,L/L共组装体形成双螺旋 $\pi$ 聚集体,CPL信号进一步增强,发光不对称因子 $|g_{lum}|$ 高达0.14,展现出优异的手性传递效率与CPL性能<sup>[14]</sup>(图2(b))。Wang等将TPE-谷氨酸(TPE-Glu)与精氨酸(Arg)通过静电和氢键协同驱动共组装,发现同手性组合(L-Arg/TPE-L-Glu)形成规整纳米管, $|g_{lum}|$ 高达0.114;而异手性组合(L-Arg/TPE-D-Glu)仅形成纳米带, $|g_{lum}|$ 仅为0.014,两者相差约8倍<sup>[15]</sup>(图2(c))。Dong等将TPE-天冬氨酸(TPE-ASP)自组装成球形纳米粒子( $|g_{lum}| \approx 2.4 \times 10^{-2}$ ),再通过静电作用与受体PDI共组装,将手性从TPE-ASP传递至PDI,在400-700 nm范围内实现了多色CPL发射,平均 $g_{lum}$ 为 $7.1 \times 10^{-3}$ 。该策略为发展宽光谱、多色乃至白光CPL材料提供了有效途径<sup>[16]</sup>。

氨基酸衍生的手性侧链及聚合物修饰,更实现了TPE基CPL材料的动态调控。Ye等设计了含联苯单键的柔性连接臂,将苯乙胺手性中心共价连接至TPE骨架,使该分子在极性不同的溶剂中可分别采取“顺式”或“反式”构象,从而驱动超分子螺旋的手性翻转,实现了通过构象动态调控手性从而使CPL信号发生可逆反转<sup>[17]</sup>。此外,Li等设计聚(L-半胱氨酸)-TPE嵌段共聚物,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧

化诱导主链构象转变,使TPE形成紧密有序堆积, $|g_{lum}|$ 达到 $6.47 \times 10^{-3}$ <sup>[18]</sup>。缬氨酸手性构型及侧链结构对TPE基材料的组装行为、光学性能及生物相互作用具有较好的调控机制。Feng等以TPE为核心、聚缬氨酸为侧臂,制备出两种星型手性AIEgens(TPE-PLV、TPE-PDV),该类星型共轭物均具有典型的AIE特性,荧光强度随浓度升高显著增强,同时具备良好的pH响应性<sup>[19]</sup>(图2(d))。Shi等将缬氨酸手性单元共价接枝到TPE基共轭聚合物侧链,该聚合物在聚集态下可自发形成规整螺旋组装体,加入R/S-扁桃酸后,复合薄膜呈现镜像Cotton效应与镜像CPL信号, $|g_{lum}|$ 达0.01, $\Phi_F$ 从6%提升至26.8%<sup>[20]</sup>。

上述研究进展表明,通过引入单一氨基酸、多肽或氨基酸衍生手性侧链,可有效调控TPE材料的自组装形貌、手性传递效率及CPL性能。这些研究进展揭示了氨基酸的手性构型、修饰数目、间隔作用及共组装方式对材料性能的调控规律,还开发出刺激响应、手性可逆反转等新型功能,为TPE基手性超分子材料的结构设计、性能优化及应用拓展提供了丰富的实验依据与理论支撑。

## 2.2 TPE-环己二胺类手性组装体系

与天然氨基酸类手性源不同,环己二胺作为典型的手性胺类化合物,凭借其刚性环己烷骨架和两个手性中心的独特结构,成为构建高稳定性手性TPE-CPL材料的重要手性源。将其通过共价键连接至TPE骨架,既能借助刚性结构约束TPE分子的旋转,减少非辐射跃迁,又能通过氨基的氢键作用促进分子有序堆积,实现手性信息的高效传递与CPL信号放大,为TPE基手性材料的性能提升与功能拓展提供了新的方向,与氨基酸修饰策略形成互补,丰富了TPE共价连接手性基团的研究体系。

近年来,国内外学者围绕TPE共价连接环己二胺类手性基团开展了大量针对性研究,Zhang等以手性环己二胺为核心手性源,通过共价键将TPE基元与金属配位位点连接,制备出一对手性金属有机笼对映体(PP/MM-TPE-Zn<sub>4</sub>)。中心手性单元通过亚胺键将手性信息直接传递至TPE核心,诱导其四个苯环呈现一致的P/M螺旋构象,在溶液中实现了TPE本征螺旋手性的稳定存在(图3(a))。金属配位与笼状结构的协同作用有效限

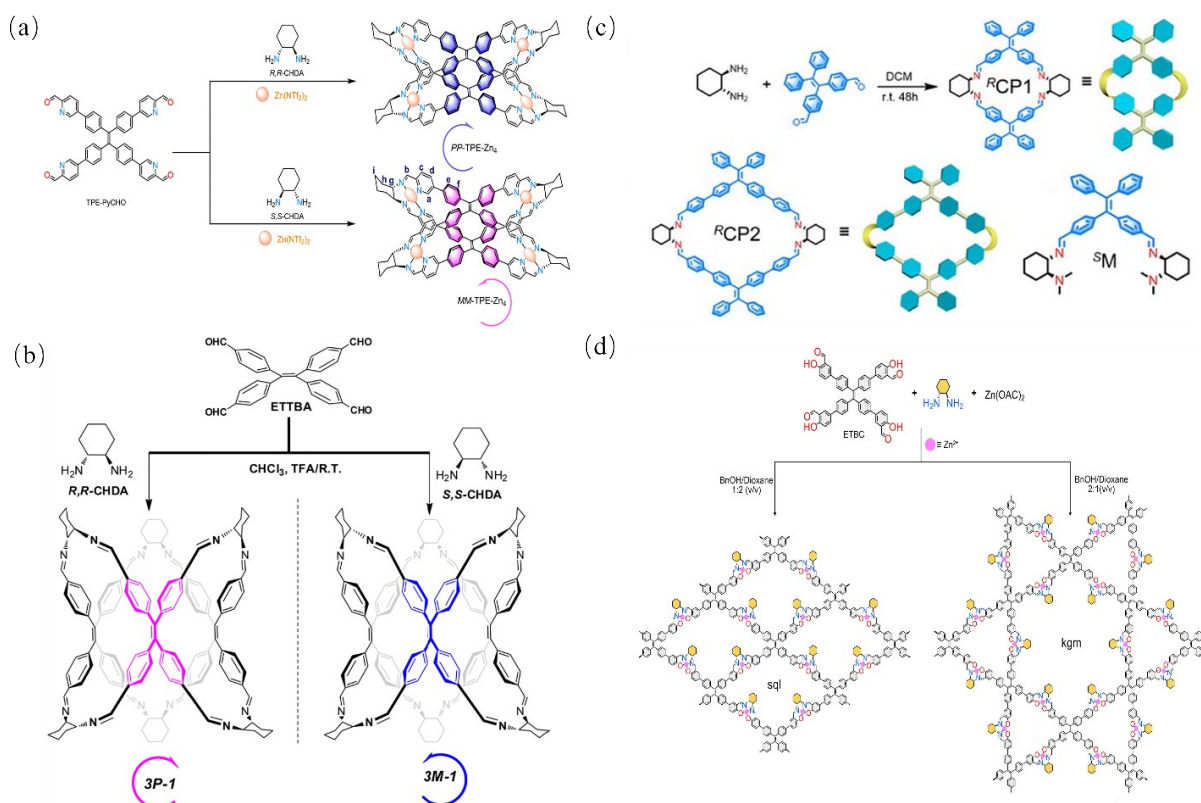


图3 (a)环己二胺与TPE构建PP/MM-TPE-Zn<sub>4</sub>大环,TPE四个苯环呈P/M螺旋构象;(b)环己二胺与TPE组装多孔有机笼3M/P-1,具有高荧光量子产率和优异CPL性能;(c)环己二胺与TPE构建手性大环,苯环间隔基的引入使大环<sup>R</sup>CP<sub>2</sub>的组装体CPL性能显著提升;(d)溶剂比例及浓度调控环己二胺-TPE共价有机框架的拓扑结构及CPL性能。

Fig. 3 (a) Cyclohexanediamine and TPE are used to construct a PP/MM-TPE-Zn<sub>4</sub> macrocycle, in which the four phenyl rings of TPE adopt P/M helical conformations. (b) Cyclohexanediamine and TPE are assembled into a porous organic cage 3M/P-1, which exhibits high fluorescence quantum yield and excellent circularly polarized luminescence (CPL) performance. (c) Cyclohexanediamine and TPE are used to construct chiral macrocycles. The introduction of a phenyl spacer significantly enhances the CPL performance of the assembled structure of macrocycle RCP2. (d) The solvent ratio and concentration regulate the topological structure and CPL performance of the cyclohexanediamine-TPE covalent organic framework.

制了TPE苯环的旋转,使得该手性构象在较宽浓度范围内得以保持。该笼在400 μM时表现出清晰的圆偏振发光信号,| $g_{lum}$ |达 $6.1 \times 10^{-4}$ 。<sup>[21]</sup>

Sun等以手性环己二胺为核心手性源与结构构建单元,将TPE基元共价引入有机笼骨架,制备出手性发光多孔有机笼,该有机笼兼具规整的多孔结构、高固态荧光量子产率(60%)与稳定的CPL性能(| $g_{lum}$ |= $4 \times 10^{-4}$ ),其多孔结构可实现手性小分子识别,进一步拓展了材料的功能维度<sup>[22]</sup>(图3(b))。Wang等将TPE共价连接环己二胺,合成出刚性不同的手性TPE大环CP1与CP2。CP1为平面方形刚性骨架,在DMSO/乙腈中自组装为微螺旋,| $g_{lum}$ |高达0.32,Φ<sub>F</sub>达到70%;而CP2因在TPE与手性中心之间插入苯环柔性间隔,结构呈V形构象,自组装仅形成无螺旋微带,| $g_{lum}$ |仅

0.0038,相差近两个数量级。该工作通过在TPE大环体系中增强分子刚性提升CPL性能,进一步提升了TPE-环己二胺体系的 $g_{lum}$ 值上限<sup>[23]</sup>(图3(c))。Yan等以TPE-双水杨醛为桥联配体,与手性二胺缩合形成Salen大环,再与Zn(II)配位,一锅法合成出手性金属大环Zn<sub>2</sub>R。在THF/H<sub>2</sub>O = 1:1时发生聚集,CD与CPL信号同时发生符号反转,且 $g_{lum}$ 值提升一个数量级。并伴随Salen单元构象的翻转,以及大环堆叠形成宏观螺旋纤维。该刺激响应行为具有高度可重复性,且通过调节水含量可连续调控 $g_{lum}$ 值。这是首例基于金属大环构象翻转的CPL信号反转体系,为发展新型手性光开关、智能传感器及信息加密材料奠定了基础<sup>[24]</sup>。Jiang等将手性环己二胺与TPE基元引入2D COF骨架,通过调控浓度及溶剂比例实现COF

拓扑结构的精准调控,环己二胺的手性构型与刚性骨架协同,实现手性信息的高效传递与自旋选择性调控,实现了手性光学性能与自旋功能的一体化,拓展了材料在自旋电子器件、量子信息等领域的潜力<sup>[25]</sup>(图3(d))。

### 2.3 TPE-糖类手性组装体系

糖类作为天然手性化合物,具有来源广泛、手性中心丰富(单糖、二糖、多糖均含有多个手性碳)、表面富含羟基、生物相容性优异的优势,将糖类通过共价键连接至TPE骨架,其多羟基结构可形成稳定的氢键网络,柔性骨架可灵活调控TPE的分子构象与聚集行为,既能有效激活TPE的AIE效应,又能实现手性信息的高效传递与放大,是构建“生物友好型手性TPE-CPL材料”的核心手性源。

Luo等将D-葡萄糖酸通过酯键共价连接至TPE骨架,研究发现手性葡萄糖酸基团空间位阻

的构象,对TPE的聚集态行为和CPL性能具有显著影响:具有缩醛结构的葡萄糖酸修饰TPE,可形成八重螺旋柱状堆积,获得显著CPL信号;而无缩醛结构的衍生物,仅形成普通层状堆积,无明显CPL响应,证明糖类手性基团的空间结构可驱动螺旋堆积,实现CPL信号从“无”到“有”的跃迁<sup>[26]</sup>(图4(a))。Yu等以葡萄糖为手性核心,通过硼酸酯键实现TPE与葡萄糖的共价连接,制备出TPE-葡萄糖共价聚合物凝胶(TPEBA@Glu)及稳定性更优的聚合物(TPEBA-Glu)。该体系中,葡萄糖的多羟基结构形成氢键网络,与TPE核心的 $\pi$ - $\pi$ 堆积作用协同,促进TPE分子有序聚集,有效约束TPE苯环的分子内旋转,使凝胶态荧光强度较溶液态提升约7倍,AIE效应显著。同时该体系最突出的优势是生物相容性优异,可实现活细胞外源性与内源性活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)的荧光检测,检测限低至 $51.2 \mu\text{M}$ <sup>[27]</sup>(图4

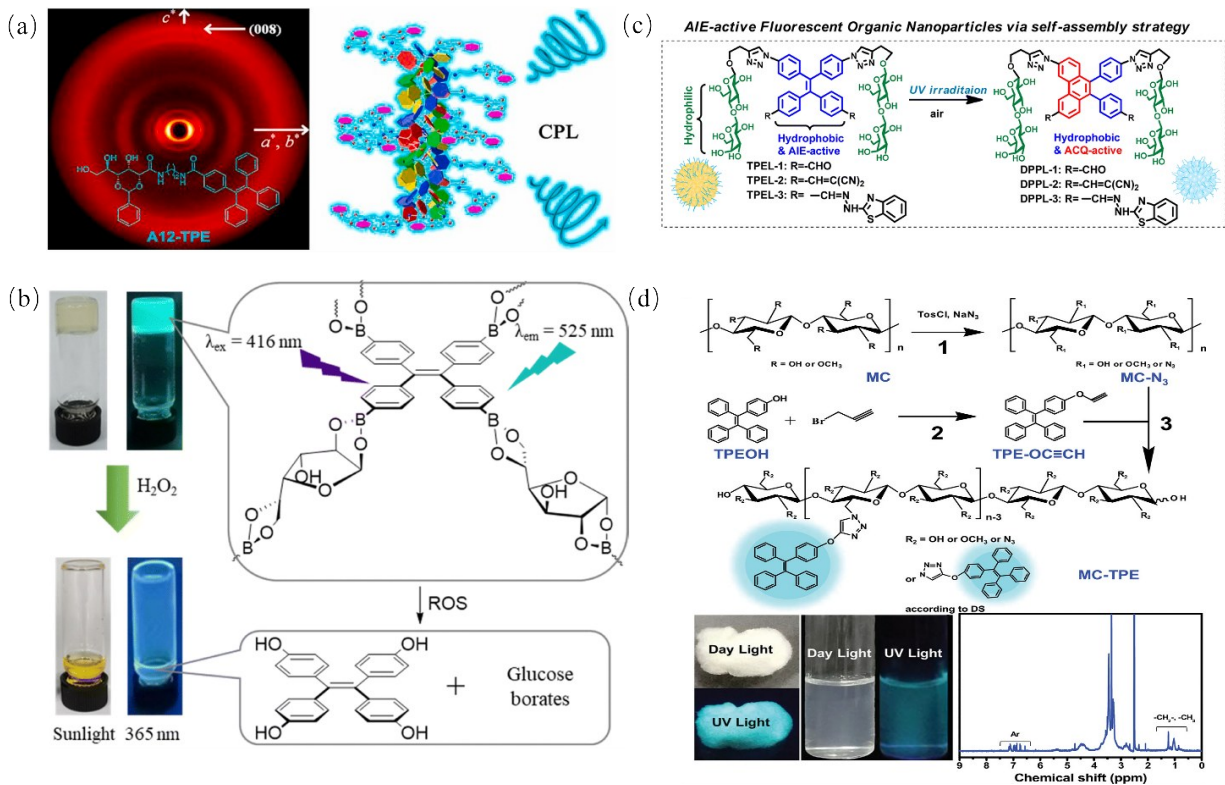


图4 (a)糖类手性基团驱动螺旋堆积产生CPL信号;(b)TPE-葡萄糖共价聚合物可实现活细胞外源性与内源性ROS的荧光检测;(c)TPE-糖衍生物自组装形成稳定的荧光有机纳米颗粒并且能发生光氧化环化反应;(d)荧光纤维素基衍生物自组装形成胶束具有荧光热响应性与热可逆性。

Fig. 4 (a) Th carbohydrate chiral groups drives helical stacking to generate CPL signals; (b) TPE-glucose covalent polymer can realize the fluorescence detection of exogenous and endogenous ROS in living cells; (c) TPE-sugar derivatives self-assemble to form stable fluorescent organic nanoparticles and can undergo photooxidative cyclization reaction; (d) Fluorescent cellulose-based derivatives self-assembled into micelles with fluorescent thermal responsiveness and thermal reversibility.

(b))。Ma等以 $\beta$ -D-半乳糖为手性核心、亲水单元及靶向单元,通过共价键将TPE基元与 $\beta$ -D-半乳糖连接,制备出具有固有AIE特性和肿瘤靶向性的两亲性共轭物(TPE-Gal)。该体系中,半乳糖的多羟基结构形成氢键网络,与TPE核心的 $\pi$ - $\pi$ 堆积作用及分子间疏水相互作用协同,驱动TPE-Gal自发组装形成均匀稳定的中空球形荧光囊泡,有效约束TPE苯环的分子内旋转,使水相比例90%时的荧光强度较纯DMSO中提升近50倍,AIE效应显著<sup>[28]</sup>。

除单糖修饰外,二糖、多糖与TPE的共价连接也展现出优势,如乳糖、壳聚糖、纤维素等二糖和多糖接枝TPE可构建层级手性聚合物,其多羟基氢键网络与聚合物链的协同作用,可进一步提升手性传递效率与CPL,同时保留多糖的可降解性与生物相容性,实现对特定客体分子的识别与响应。Li等在TPE上共价连接亲水性的乳糖基团,合成了一系列两亲TPE-糖衍生物(TPEs)。这种分子不仅赋予了材料良好的水溶性,使其能够在水溶液中自组装形成稳定的荧光有机纳米颗粒,克服了传统AIE分子需有机溶剂辅助的局限;同时,糖基的引入并未干扰TPE的光响应性,这些纳米颗粒在紫外光照射下可通过光氧化环化反应,展现出多样化的动态荧光变化。二糖的生物相容性使该材料可用于柔性防伪标签、生物兼容型防伪油墨等场景,弥补了传统防伪材料毒性高、环境适应性差的短板,凸显了二糖-TPE体系在智能防伪领域的应用潜力<sup>[29]</sup>(图4(c))。

Wang等以壳聚糖为手性核心、亲水骨架及识别单元,通过共价键连接TPE基元,制备出具有固有AIE特性、 $\text{Fe}^{3+}$ 识别和细菌检测功能的壳聚糖基荧光探针(CS-AIE探针)。壳聚糖的柔性多糖骨架与大量羟基使其成为优良的亲水单元,同时作为天然手性源,其众多手性碳通过共价键将手性信息高效传递至AIE发色团;壳聚糖分子链上的氨基与羟基兼具识别功能,可特异性结合 $\text{Fe}^{3+}$ 和细菌表面官能团,充分发挥多糖类手性源的结构优势与生物相容性<sup>[30]</sup>。Wang等以甲基纤维素(MC)为手性核心与亲水基质,通过叠氮-炔点击反应将TPE共价标记于MC分子链,制备出荧光纤维素基衍生物(MC-TPE),进一步丰富了多糖-TPE共价体系的功能维度。该体系中,甲基纤维素的多糖链骨架提供了丰富的手性碳与羟基,通

过共价键将手性信息传递至TPE发色团,同时羟基形成的氢键网络与TPE核心的疏水相互作用协同,驱动MC-TPE在水中自组装形成尺寸均一的胶束( $42\pm 6$  nm),有效约束TPE苯环分子内旋转,激活AIE效应;其优势在于兼具荧光热响应性与热可逆性,在尺寸、透光率及荧光强度上均呈现温度依赖性变化,可作为荧光热传感器使用,同时具备优异的生物相容性与无毒性,成功应用于MCF-7细胞成像,解决了传统TPE体系水溶性差及功能单一的问题,体现了多糖类手性源在材料领域的应用潜力<sup>[31]</sup>(图4(d))。

上述将TPE与手性单元共价连接,进而通过手性组装构筑CPL材料的策略已经取得了一定进展,发光不对称因子可提高至 $10^1$ 水平,发光量子效率由于AIE特性也实现了同步提高,是发展高性能CPL材料的理想途径之一,然而,如何进一步提高发光不对称因子至大于0.5的较高水平仍面临挑战,需要进一步优化分子设计和组装策略,可考虑的方向包括刚性间隔基设计、多点手性协同及聚集态精准调控等。

### 3 非手性TPE与手性体系的共组装及CPL性能

四苯乙烯本身不具备手性中心,但凭借其独特的螺旋桨式构象、优异的AIE特性及灵活的组装能力,可通过与手性分子共组装、在聚合物基质中协同组装或自身功能化诱导手性等方式,构建手性超分子组装体,实现CPL及调控。这类体系无需对TPE进行复杂的手性共价修饰,通过超分子相互作用(氢键、 $\pi$ - $\pi$ 堆积、疏水作用等)即可实现手性传递与放大,具有制备简便、性能可调、功能多元化等优势。

#### 3.1 TPE与手性小分子共组装体系

将非手性TPE作为添加组分,通过非共价作用与手性小分子共组装,是构建手性CPL材料的简便有效策略。在非共价相互作用的诸多驱动模式中,氢键因其方向性、可逆性及易于功能化修饰的特点,成为构建手性超分子组装体、实现CPL动态调控的重要工具。Liu等基于此策略,将含羧基的TPE衍生物(TPEDA)与手性吡啶-胆固醇凝胶因子(m/p-PMPCC)通过氢键驱动共组装,成功构建了具有左旋螺旋形貌的超分子凝胶。研究发现,凝胶中的紧密堆积环境显著加速

了 TPEDA 的光环化反应,并诱导其氧化产物 9,10-二苯基菲衍生物(DPPDA)在聚集态下仍保持高效发光,荧光增强 105 倍。更重要的是,该共组装体系在紫外光照前后实现了 CPL 信号的反转<sup>[32]</sup>(图 5(a))。Hu 等通过物理共混实现 530 -

700 nm 全色 CPL 发射, $|g_{\text{L}} - \text{m}|$  达  $1.7 \times 10^{-2}$ <sup>[33]</sup>。上述研究表明,通过外部刺激可以调控分子构象、触发光化学反应或激活光谱匹配,为 CPL 材料的颜色调谐、符号切换及手性放大开辟了多维动态调控路径。

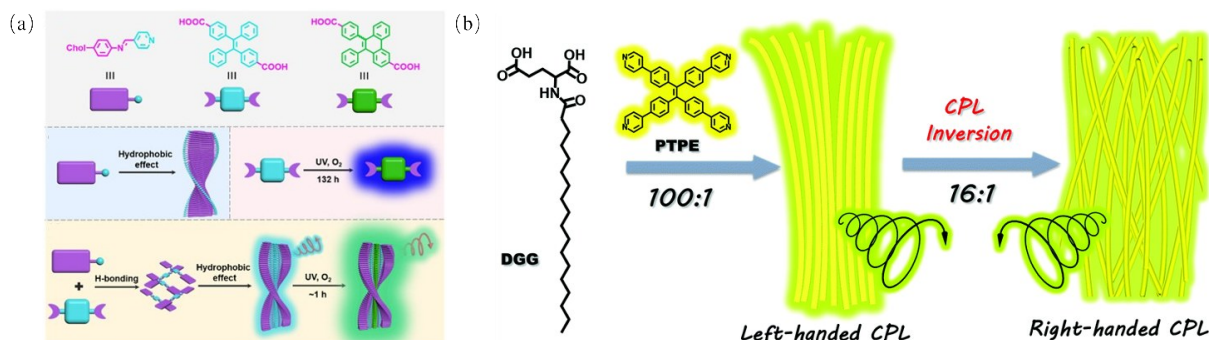


图 5 (a)光诱导驱动 TPEDA 和 m/p-PMPCC 共组装体系发生 CPL 信号反转;(b)摩尔比的改变可使得 PTPE 和 DGG 共组装体系发生 CPL 信号反转。

Fig. 5 (a) The CPL signal of the co-assembly system of TPEDA and m/p-PMPCC was reversed by light induction; (b) The change of molar ratio can reverse the CPL signal of PTPE and DGG co-assembly system.

除外部刺激外,组分比例的精细调控同样为 CPL 手性的动态切换提供了简便有效的途径。Li 等基于此思路,将含吡啶基的 TPE 衍生物(PTPE)与手性谷氨酸凝胶因子(DGG)通过羧酸-吡啶氢键驱动共组装,发现仅通过改变两者的摩尔比即可实现 CPL 手性的可逆反转。当 PTPE/DGG 摩尔比为 1:100 时体系呈现左手 CPL 信号( $g_{\text{L}} - \text{m} = 0.011$ );而当摩尔比增加至 1:16 时,PTPE 与 DGG 形成氢键复合物并主导组装体的形成,导致分子堆积模式由平行层状转变为倾斜层状,CPL 信号相应反转为右手( $g_{\text{L}} - \text{m} = -0.015$ )。该工作证明,无需改变手性组分本身,仅通过调控非手性发光体的掺杂比例即可实现对超分子手性的精确控制,为 CPL 材料的性能优化提供了新的调控维度<sup>[34]</sup>(图 5(b))。上述基于非共价相互作用的共组装策略,虽已实现 CPL 信号的多维度调控,但在 CPL 强度放大、宽色域发射及实际器件应用适配性上仍有提升空间。

液晶体系依托其独特的长程有序性,为高效手性传递与 CPL 信号强化提供了新的解决方案<sup>[8, 35, 36]</sup>。通过直接将 TPE 衍生物掺杂于手性液晶体系,可借助液晶相极强的自组织能力,诱导 TPE 基元形成规整的螺旋手性结构;同时,液晶相的有序堆积特性能够显著强化手性传递效率,进而通过圆偏振反射等物理机制实现 CPL 信号的大幅增强与调控。

Ni 等将非手性 AIE 发光体掺杂至可聚合手性向列相液晶体系中,通过胆甾相光聚合制备了一系列结构色聚合物薄膜,通过调控手性掺杂剂含量,不仅实现薄膜反射颜色从红至蓝的连续可调,更获得了强 CPL 信号, $|g_{\text{L}} - \text{m}|$  高达 0.53 - 0.58,为结构色 CPL 材料的开发奠定了基础<sup>[37]</sup>。Zhang 等合成了以 TPE 为给体、氟代苯并噻二唑为受体的 D-A 共轭低聚物,将其以 0.1 - 2.0 wt% 掺杂至可聚合胆甾相液晶体系中,制备出黄橙色结构色聚合物薄膜,其中 R-T-CLC 薄膜呈右手 CPL( $g_{\text{L}} - \text{m}$  达 -0.77),S-T-CLC 薄膜呈左手 CPL( $g_{\text{L}} - \text{m}$  达 0.75),成功实现发射波长从蓝光至黄橙光的有效拓展,丰富了 CPL 材料的色域范围<sup>[38]</sup>。Ye 等合成了一种新型含硫 TPE 四环螺旋体(TPEH)并将其掺杂入向列相液晶 5CB 中,圆偏振发光信号增强高达 100 倍,发光不对称因子  $g_{\text{L}} - \text{m}$  绝对值达到 0.21;进一步通过将手性传递给其他非手性荧光染料,成功实现了从紫光到近红外(400 - 850 nm)的宽波段全色及白光 CPL 发射,同时兼具高达 0.37 的  $g_{\text{L}} - \text{m}$  值和 92% 的荧光量子产率,为开发高效、宽色域的圆偏振发光材料提供了通用策略<sup>[39]</sup>。

综上,非手性 TPE 与手性小分子的共组装体系,以氢键等非共价相互作用为核心驱动力,通过外部刺激、组分比例、手性识别等多维度调控,可实现 CPL 信号的动态切换、强度优化及功能拓展;而 TPE 基液晶材料则借助液晶相的长程有序组

及圆偏振反射等机制,进一步实现了CPL信号的增强与宽色域发射。

### 3.2 TPE与手性聚合物及限域结构的手性诱导体系

相较于小分子体系,将TPE与手性聚合物或限域结构(如大环、分子笼、共价有机框架等)相结合,可以弥补小分子体系的不足,聚合物骨架或刚性限域空腔可以提供更加稳定且高度有序的手性微环境,能够有效限制TPE苯环的自由旋转,强化手性从主体到发光单元的高效传递。此外,聚合物体系良好的成膜性与限域结构的孔道可调性,使材料更易集成于光学器件、手性传感器及防伪标签等实际应用场景。

手性聚合物通过氢键、 $\pi-\pi$ 堆积或静电相互作用与非手性TPE协同组装,在不改变分子共价结构的前提下,实现手性信息向发光中心的传递。这类体系的核心在于手性微环境诱导与分子间相互作用协同。手性聚合物所提供的有序取向环境可通过激发态耦合实现手性传递。该体系通过荧光共振能量转移(Förster Resonance Energy Transfer, FRET)机制,可以将手性骨架的手性信息通过能量转移过程传递至TPE发色团,从而实现CPL信号的放大。Wang等将(S)-联萘、茆与TPE按不同摩尔比共聚,合成系列三元手性共轭聚合物,在THF/H<sub>2</sub>O混合溶剂中,通过调节聚合物摩尔比可精准调控分子内FRET过程,进而实现对聚集诱导圆偏振发光(Aggregation-Induced Circularly Polarized Luminescence, AICPL)信号的调控, $g_{lum}$ 达到 $\pm 4.0 \times 10^{-3}$ <sup>[40]</sup>,为AICPL增强型材料的设计提供

了新颖思路。总体而言,这种非共价共组装体系的优势在于体系构建简单、调控灵活,但其手性传递效率较依赖于组装有序度与分子间耦合强度。

除聚合物体系外,各类限域结构(如大环、分子笼及多孔框架材料)通过空间约束与有序排列,也可显著增强手性传递效率与CPL信号<sup>[41]</sup>。这类体系的核心机制在于通过TPE构筑的大环或笼状结构可包结手性客体,利用空间限域效应与有序堆积诱导实现手性识别与放大。例如,Cheng等利用非手性TPE基八阳离子分子笼,在水溶液中通过疏水与静电作用以1:2比例高亲和力结合芳香二肽,借助笼内空间限域与TPE单元动态旋转构象,在手性客体诱导下发生手性自适应构象重排,实现高效超分子手性传递,产生镜像对称的CD与CPL响应,并可精准识别多肽序列差异与手性构型,进一步将手性信号放大并拓展至多肽、蛋白质等生物分子的特异性光学传感,充分验证了限域结构在强化手性传递、提升CPL信号与实现序列选择性识别中的关键作用。<sup>[42]</sup>(图6(a));Yuan等以六边形非手性TPE基荧光大环(TPEM)为手性与能量中继载体,结合手性BINOL单元(BDA)与荧光受体构建级联FRET体系;依托大环空腔的主客体作用,手性由BDA经TPEM接力传递至非手性染料,实现多级手性传递与同步放大,能量转移效率最高可达98.6%,并可精准调控实现可见光到近红外的CPL发射,最终实现覆盖360-800 nm、 $g_{lum}$ 达到 $3.5 \times 10^{-2}$ 的明亮白光CPL,证明TPE类限域大环在级联光能捕获、远程手性传递与高效CPL信号放大中的关键作用<sup>[43]</sup>

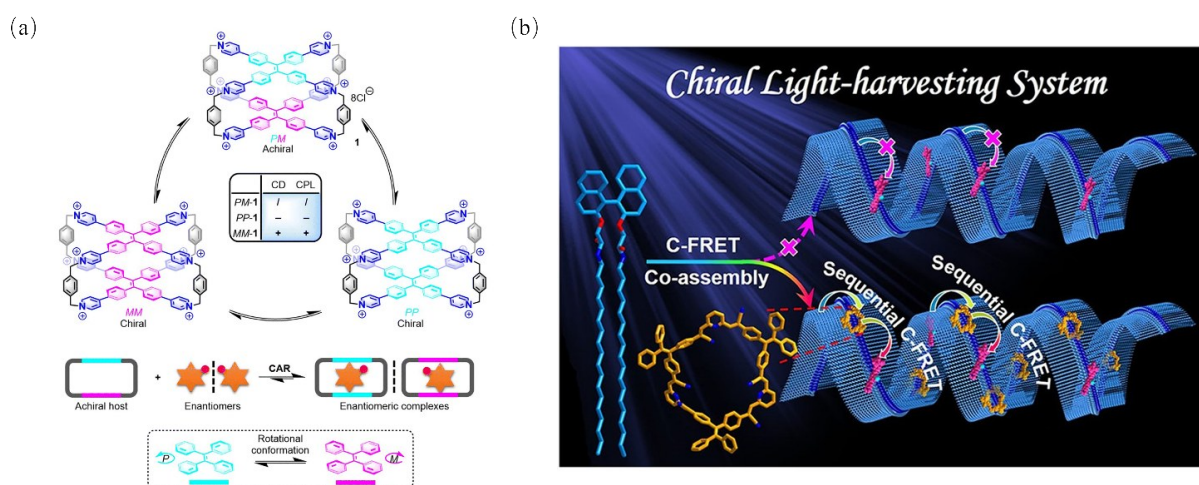


图6 (a)TPE八阳离子笼能高选择性包结芳香族二肽;(b)TPE六方大环通过级联FRET实现手性的逐级传递与放大。

Fig. 6 (a) TPE octacationic cages enable highly selective encapsulation of aromatic dipeptides; (b) TPE hexagonal macrocycles achieve stepwise chirality transfer and amplification through cascade FRET.

(图 6(b)); Wang 等利用铂(II)金属大环的阳离子空腔静电驱动包结酪氨酸衍生物, 可以将手性传递至刚性金属骨架, 实现 550-650 nm 的可调 CPL 发射<sup>[44]</sup>。

总体而言, TPE 与手性聚合物及限域结构的手性共组装, 核心是通过手性微环境构建、限域效应调控及主客体相互作用, 实现手性从主体到 TPE 发光单元的高效传递与 CPL 信号的精准调控。不同组装策略各具优势, 所构建的 TPE 基 CPL 材料在不对称因子、发光稳定性、功能拓展性等方面表现出差异化特性, 不仅丰富了手性发光材料的构筑路径, 更推动了 CPL 材料在光学器件、手性识别、对映体分析等领域的应用探索。

综合来看, 手性 TPE 分子的自组装, 以及非手性 TPE 与手性体系的共组装, 均可用于制备具有较高  $g_{\text{em}}$  值的圆偏振发光材料。从机制层面分析, TPE 体系的 CPL 放大效率取决于三个关键因素: 手性主体的有序度、TPE 与手性主体之间的耦合强度, 以及聚集态的紧密程度。此外, TPE 体系的 CPL 信号究竟源于苯环的 P/M 螺旋构象的单一手性偏好, 还是源于组装体宏观螺旋结构的光学活性仍存在争议。近期研究表明, 二者可能共存且相互影响。未来研究需结合单晶结构解析、圆

二色光谱与理论计算, 以厘清手性传递与放大的微观路径。

## 4 TPE-CPL 材料的应用探索

圆偏振发光材料凭借其独特的手性光学特性, 在手性光学器件、信息加密防伪、手性传感检测等多个前沿领域展现出应用潜力, 已成为近年来材料科学领域的研究热点之一。基于上述手性构建与聚集态调控策略, TPE 基 CPL 材料依托强固态发光、可调控手性及刺激响应性三大核心特性, 在多个应用领域展现出独特优势。

### 4.1 圆偏振发光器件

圆偏振发光器件是 CPL 材料最核心的应用场景之一, TPE 基 CPL 材料可直接作为手性 OLED 的发光层, Ye 等人通过单手性 TPE helicenes-5CB 掺杂体系, 实现了全色区高亮度、高不对称因子 CPL 发射, 该方法无需合成复杂手性发光体, 仅少量掺杂即可实现高性能发射, 兼具多重优势, 为 CP-OLED 及 3D 显示背光模组提供了有效的参考<sup>[45]</sup>(图 7(a))。He 等采用 PMMA 掺杂策略, 有效制备出高性能 CPL 薄膜, 解决了传统 CPL 分子固态发光的短板<sup>[46]</sup>。此外, Yuan 等将 TPE 应用于白光 CPL-LED 器件<sup>[43]</sup>, Hu 等发现 TPE 单晶的角度可调 CPL 特性, 为可调谐手性光学器件开发提供了新平台<sup>[33]</sup>。TPE

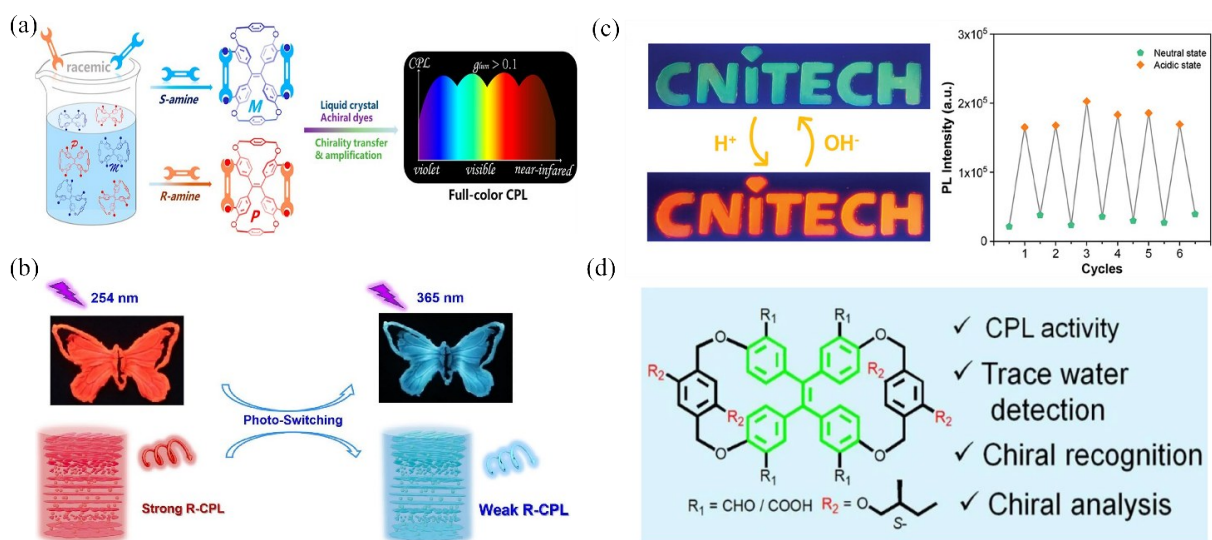


图 7 (a) TPE helicenes-5CB 掺杂体系应用于圆偏振发光器件; (b) TPEC-CNC-Eu(DA)<sub>3</sub> 复合薄膜双发射和光切换实现光学信息防伪与加密; (c) 掺杂 S-Rhodol-TPE 的薄膜可应用于光学信息安全与防伪; (d) TPE 二环四羧实现手性传感和识别。

Fig. 7 (a) TPE helicenes-5CB doped system applied to circularly polarized light-emitting devices; (b) TPEC-CNC-Eu(DA)<sub>3</sub> composite film dual emission and optical switching to achieve optical information anti-counterfeiting and encryption; (c) The films doped with S-Rhodol-TPE can be applied to optical information security and anti-counterfeiting; (d) TPE dicyclopentacarboxylic acid for chiral sensing and recognition.

的AIE效应保障了器件固态发光强度,进一步完善了TPE基CPL器件的制备技术,推动了手性光电器件向低成本、高性能、多功能方向发展。

#### 4.2 光学信息安全与防伪

随着信息安全需求的不断提升,开发多模态、高安全等级的防伪材料成为研究重点。借助CPL的独特性与TPE的AIE特性,TPE基CPL材料可实现多重加密与高安全等级防伪,利用特定条件下才显现的CPL图案提升防伪可靠性。Xing<sup>[47]</sup>(图7(b))、Ni<sup>[37]</sup>、Liu<sup>[48]</sup>、Sun<sup>[49]</sup>(图7(c))等人分别通过不同复合薄膜体系,构建出多种加密防伪图案,整合了显隐切换、结构色、圆偏振光开关等多模态特性,具备防伪层级丰富、仿制难度高的优势,为高端光学防伪材料开发提供了多种新思路。这种多体系的研究为不同场景下的防伪需求提供了适配方案,推动了光学防伪技术的更新升级。

#### 4.3 手性传感与识别

手性传感与识别在药物研发、生物检测、环境监测等领域具有重要意义,传统手性传感方法多存在灵敏度低、选择性差、检测模式单一的局限,亟需开发新型高效的手性传感材料。TPE基CPL材料在手性传感与识别领域应用广泛,主要包括“Turn-on”型手性传感和手性环境探针,还可通过杂手性笼实现三模态手性识别。Yu<sup>[50]</sup>、Su<sup>[51]</sup>、Luo<sup>[52]</sup>、Xu<sup>[53]</sup>(图7(d))、Hu<sup>[54]</sup>等人分别通过不同TPE基体系,实现了手性分子的高灵敏、高选择性检测及对映体纯度定量分析,实现了手性物质分离与生物分子识别。Shi<sup>[55]</sup>、Cheng<sup>[42]</sup>等人的研究整合了多重功能,开辟了手性传感与生物领域的交叉应用的新方向。TPE的AIE效应可实现传感信号的放大,手性单元与分析物的特异性相互作用(氢键、疏水作用等)保障了识别的可视化选择性,

多模态检测模式则提升了检测的准确性,为手性分析技术提供了全新的研究思路与技术支撑。

## 5 结论与展望

本文系统综述了基于四苯乙烯的圆偏振发光材料在手性组装、聚集态调控及应用探索方面的研究进展。TPE凭借优异的聚集诱导发光特性、结构可修饰性与可控组装行为,成为构建高性能圆偏振发光材料的理想平台。研究者通过共价手性修饰、超分子共组装及非手性体系手性诱导等策略,实现了CPL信号强度、符号与发射波长的有效调控,为手性光学器件、信息安全防伪与手性传感识别等领域提供了重要研究基础。

当前TPE基CPL体系仍面临如下挑战:高发光不对称因子与高荧光量子效率难以协同优化,手性传递与放大的微观机制缺乏定量解析,红光与近红外波段材料稀缺,器件化与实用化水平不足。未来研究应聚焦手性从分子到宏观组装体的传递与放大机制,结合原位表征与理论计算建立构效关系;通过刚性结构设计、有序聚集调控与能量传递体系优化,实现高偏振度与高发光效率的兼顾;拓展长波段、白光与多刺激响应CPL体系,提升材料的动态可调性与环境适应性。在应用层面,需重点突破CP-OLED器件的载流子传输与发光性能匹配问题,构建多模态防伪体系提升安全等级,并发展高生物相容性手性探针以满足活体传感与对映体识别需求。随着手性组装机理的深化、分子与组装策略的创新及多学科交叉融合,TPE基CPL材料将在新一代显示、高端信息安全、精准手性分析与生物医学诊疗等领域实现更广泛的应用,推动手性光学材料向高效、智能、实用化方向持续发展。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ZHOU Q, ZHANG X, NING L, *et al.* Boosting FRET efficiency of chromophores with aggregation-caused quenching by a crystallization-induced precise co-assembly strategy[J]. *Small Methods*, 2025,9(4):2401439.
- [ 2 ] HUANG Y, XING J, GONG Q, *et al.* Reducing aggregation caused quenching effect through co-assembly of PAH chromophores and molecular barriers[J]. *Nat. Commun.*, 2019,10(1):169.
- [ 3 ] LUO J, XIE Z, LAM J W Y, *et al.* Aggregation-induced emission of 1-methyl-1,2,3,4,5-pentaphenylsilole[J]. *Chem. Commun.*, 2001(18):1740-1741.
- [ 4 ] LI D-M, ZUO R, WANG J, *et al.* The designs and applications of tetraphenylethylene macrocycles and cages[J]. *Chem. - Eur. J.*, 2025,31(6):e202403715.
- [ 5 ] CHEN J, TANG X, HU Y, *et al.* Amphiphilic tetraphenylethylene derivative with hydrophobic - hydrophilic complemen-

- tarity to amyloid oligomers for in situ imaging and modulation of membrane-disruptive neurotoxicity[J]. *Anal. Chem.*, 2026,98(3):2464-2473.
- [ 6 ] MUHAMMED MUNTHASIR A T, RANI P, DHANALAKSHMI P, *et al.* Quadrupling the PLQY of tetraphenylethylene by covalently linking it with isosteric tetraarylamino borane: a potential candidate for multicolor live cell imaging[J]. *Inorg. Chem.*, 2025,64(12):5878-5892.
- [ 7 ] 田茜, 何平. 含有四苯基乙烯的星状聚集诱导发光材料的合成[J]. 广东化工, 2019,46(09):39-40.  
TIAN X, HE P. Synthesis of a Star-shaped aggregation-induced emission material containing tetraphenyl ethylene[J]. *Guangdong Chem. Ind.* 2019,46(09):39-40. (in Chinese)
- [ 8 ] 王梦竹, 邓勇靖, 刘淑娟, 等. 有机自组装低维圆偏振发光材料的研究进展[J]. 中国光学, 2021,14(01):66-76.  
WANG M Z, DENG Y J, LIU S J, *et al.* Research progress on organic self-assembling low-dimensional circularly polarized luminescent materials[J]. *Chin. Opt.* 2021,14(01):66-76. (in Chinese)
- [ 9 ] LIU Q M, XIA Q, WANG S, *et al.* In situ visualizable self-assembly, aggregation-induced emission and circularly polarized luminescence of tetraphenylethylene and alanine-based chiral polytriazole[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018,6(17):4807-4816.
- [ 10 ] GOSKULWAD S P, KOBALSI M A, LA D D, *et al.* Supramolecular chiral helical ribbons of tetraphenylethylene-appended naphthalenediimide controlled by solvent and induced by l- and d-alanine spacers[J]. *Chem. Asian J.*, 2018,13(24):3947-3953.
- [ 11 ] CHU N-T, CHAKRAVARTHY R D, SHIH N-C, *et al.* Fluorescent supramolecular hydrogels self-assembled from tetraphenylethylene (TPE)/single amino acid conjugates[J]. *RSC Adv.*, 2018,8(37):20922-20927.
- [ 12 ] WANG X, ZHAO Z H, XUE T R, *et al.* Nanoengineered polypeptides from tetraphenylethylene-functionalized N-carboxyanhydride: Synthesis, self-assembly and intrinsic aggregation-induced emission[J]. *Prog. Nat. Sci. -Mater. Int.*, 2021,31(4):541-545.
- [ 13 ] BERA S, UMESH, BHATTACHARYA S Enhanced circularly polarized luminescence attained via self-assembly of heterochiral as opposed to homochiral dipeptides in water[J]. *Chem. Sci.*, 2024,15(34):13987-13997.
- [ 14 ] WANG Y, NIU D, OUYANG G, *et al.* Double helical  $\pi$ -aggregate nanoarchitectonics for amplified circularly polarized luminescence[J]. *Nat. Commun.*, 2022,13(1):1710.
- [ 15 ] WANG S, HAO W, SHANG W, *et al.* Co-assembly of tetraphenylethylene-derived glutamic acid and arginine via chiral recognition for boosting circularly polarized luminescence[J]. *Chemistryselect*, 2025,10(27):e03332.
- [ 16 ] DONG H H, LI H J, TIAN E Q, *et al.* White circularly polarized luminescence from a dual-component emitter induced by FRET between tetraphenylene and PDI derivatives[J]. *Nanoscale*, 2025,17(6):3086-3094.
- [ 17 ] YE Q, ZHENG F, ZHANG E, *et al.* Solvent polarity driven helicity inversion and circularly polarized luminescence in chiral aggregation induced emission fluorophores[J]. *Chem. Sci.*, 2020,11(36):9989-9993.
- [ 18 ] LI Z F, LIU Y, WANG Y W, *et al.* Visual  $\beta$ -sheet-to- $\beta$ -turn transition in luminescent polymeric vesicles for color-reporting drug delivery[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025,64(37):e202503875.
- [ 19 ] FENG W, LI G, TAO L, *et al.* Poly(amino acid)s-based star AIEgens for cell uptake with pH-response and chiral difference[J]. *Colloids Surf. B. Biointerfaces*, 2021,202:111687.
- [ 20 ] SHI F, ZHANG W, ZHANG J, *et al.* Tetraphenylethylene-based conjugated polymers with valine-containing side chains: aggregation-induced emission, helical self-assembly, complexation-induced circularly polarized luminescence[J]. *Eur. Polym. J.*, 2024,218:113342.
- [ 21 ] ZHANG H-J, LAI Y-L, YANG H, *et al.* Homochiral metalated tetraphenylethylene-based organic cages: unusual chiral and luminescent behavior depending on thermodynamic and kinetic aggregation[J]. *Aggregate*, 2024,5(5).
- [ 22 ] SUN Y L, WANG Z, MA H, *et al.* Chiral emissive porous organic cages[J]. *Chem. Commun.*, 2023,59(3):302-305.
- [ 23 ] WANG S, WU S, WANG R, *et al.* Twisting chiral aggregation-induced emission macrocycles into a microhelix with boosted circularly polarized luminescence[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025,64(33):e202507992.
- [ 24 ] YAN Q-Q, TESSAROLO J, HASEGAWA S, *et al.* Solvent-triggered aggregation-induced reversal and enhancement of circularly polarized luminescence in chiral salen metalla-macrocycles[J]. *Small*, 2025,21(37):2500751.
- [ 25 ] JIANG C, JIN C Y, LV Y, *et al.* Topology-controlled chirality and spin selectivity in two-dimensional covalent organic frameworks[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2026,148(2):2551-2562.

- [ 26 ] LUO H, REN X-K, ZHANG B-H, *et al.* Synthesis and properties of tetraphenylethylene derivatives with different chiral substituents: From helical supermolecular structure to circularly polarized luminescence [J]. *Dyes Pigm.*, 2021, 188: 109148.
- [ 27 ] YU M, XU N, CAI X-M, *et al.* Macroscopic and fluorescence detection of reactive oxygen species by using a glucose-linked tetraphenylethylene polymer gel[J]. *New J. Chem.*, 2023, 47(18): 8484-8488.
- [ 28 ] MA W, BI J, WU H, *et al.* An amphiphilic micromolecule self-assembles into vesicles for visualized and targeted drug delivery[J]. *ACS Med. Chem. Lett.*, 2020, 11(8): 1562-1566.
- [ 29 ] LI X-F, ZHOU W, LIU Y-C, *et al.* Design and assembly of AIE-active fluorescent organic nanoparticles for anti-counterfeiting fluorescent hydrogels and inks[J]. *Chem. Commun.*, 2022, 58(82): 11547-11550.
- [ 30 ] WANG P, LV Y, HOU X, *et al.* Chitosan based fluorescent probe with AIE property for detection of Fe<sup>3+</sup> and bacteria [J]. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2024, 279: 135478.
- [ 31 ] WANG H, WANG F, DENG P, *et al.* Synthesis and fluorescent thermoresponsive properties of tetraphenylethylene-labeled methylcellulose[J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2021, 42(3): 2000497.
- [ 32 ] LIU G, YAO L, FU K, *et al.* Photocyclization-induced emission enhancement and circularly polarized luminescence Inversion of achiral emitters in co-assembled gels[J]. *Small Struct.*, 2022, 3(11): 2200209.
- [ 33 ] HU M, YE F-Y, DU C, *et al.* Tunable circularly polarized luminescence from single crystal and powder of the simplest tetraphenylethylene helicate[J]. *Acs Nano*, 2021, 15(10): 16673-16682.
- [ 34 ] LI P, LU B, HAN D, *et al.* Stoichiometry-controlled inversion of circularly polarized luminescence in co-assembly of chiral gelators with an achiral tetraphenylethylene derivative[J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(15): 2194-2197.
- [ 35 ] 张茂鑫, 乔世一, 张翱, 等. 具有聚集诱导发光功能的圆偏振发光液晶材料 [J]. *液晶与显示*, 2023, 38(10): 1305-1321.
- ZHANG M X, QIAO S Y, ZHANG A, *et al.* Circularly polarized luminescent liquid crystal materials with aggregation-induced emission functionality[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*. 2023, 38(10): 1305-1321. (in Chinese)
- [ 36 ] 曾雨婷, 张艳芳, 黄汉军, 等. 四苯基乙烯室温液晶发光材料的制备与表征 [J]. *化学工业与工程*, 2022, 39(03): 26-32.
- ZENG Y T, ZHANG Y F, HUANG H J, *et al.* Preparation and characterization of tetraphenylethylene derivative as room temperature liquid crystalline luminescent material[J]. *Chem. Ind. Eng.* 2022, 39(03): 26-32. (in Chinese)
- [ 37 ] NI B, LI Y, LIU W, *et al.* Circularly polarized luminescence from structurally coloured polymer films[J]. *Chem. Commun.*, 2021, 57(22): 2796-2799.
- [ 38 ] ZHANG W, NI B, LI H, *et al.* Circularly polarized luminescence from oriented polymer films doped with a tetraphenylethylene-based conjugated oligomer[J]. *Mater. Chem. Front.*, 2021, 5(14): 5471-5477.
- [ 39 ] YE F Y, HU M, DU C, *et al.* Clear disclosure of hierarchical chirality transfer mechanism and wide full-color and white-light CPL emissions with both high  $g_{lum}$  and intensity by TPE helicates[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(2): 2201784.
- [ 40 ] WANG Z, LIU S, WANG Y, *et al.* Tunable AICPL of (S)-binaphthyl-based three-component polymers via FRET mechanism[J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2017, 38(14): 1700150.
- [ 41 ] 韩欣, 张吉富, 肖健成, 等. 具有 AIE 性质的金属有机笼的合成研究进展 [J]. *发光学报*, 2026, 47(02): 267-280.
- HAN X, ZHANG J F, XIAO J C, *et al.* Recent advances in synthesis of metal-organic cages with aggregation-induced emission properties[J]. *Chin. J. Lumin.* 2026, 47(02): 267-280. (in Chinese)
- [ 42 ] CHENG L, TIAN P, DUAN H H, *et al.* Chiral adaptive recognition with sequence specificity of aromatic dipeptides in aqueous solution by an achiral cage[J]. *Chem. Sci.*, 2023, 14(4): 833-842.
- [ 43 ] YUAN Y-X, JIA J-H, SONG Y-P, *et al.* Fluorescent TPE macrocycle relayed light-harvesting system for bright customized-color circularly polarized luminescence[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2022, 144(12): 5389-5399.
- [ 44 ] WANG N, ZHAO J, XU Q, *et al.* Platinum(ii) metallacycles as highly affinitive hosts for dendritic amino acids with tunable circularly polarized luminescence[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(37): 13860-13870.
- [ 45 ] YE F-Y, HU M, ZHENG Y-S Asymmetric synthesis of tetraphenylethylene helicates and their full-color CPL emission with high  $g_{lum}$  and high fluorescence quantum yield[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(35): 42056-42065.
- [ 46 ] HE J, FAN Y, LIAN Z, *et al.* 2.2 Paracyclophane-based double helices: tunable circularly polarized luminescence driven by self-assembly[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(10): 2302221.

- [ 47 ] XING L, LI G, SUN Y, *et al.* Dual-emitting cellulose nanocrystal hybrid materials with circularly polarized luminescence for anti-counterfeiting labels[J]. *Carbohydr. Polym.*, 2023,313:120856.
- [ 48 ] LIU J, XU L, YANG N, *et al.* Enhancing circularly polarized luminescence in chiral fluorescent dyes via cholesteric liquid crystal polymer networks[J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2025,7(6):4029-4037.
- [ 49 ] SUN J X, HAN M Y, YANG G J, *et al.* High-efficiency circularly polarized luminescence regulation of a dye-doped polymer film by acid/aggregation[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025,13(3):2402082.
- [ 50 ] YU W, HU M, WEN X, *et al.* CPL on/off switching by enantiomer encapsulation in TPE heterochiral molecular cages [J]. *Chem. Sci.*, 2025,16(44):20924-20930.
- [ 51 ] SUN Y-L, WANG Z, MA H, *et al.* Chiral emissive porous organic cages[J]. *Chem. Commun.*, 2023,59(3):302-305.
- [ 52 ] LUO Y, HU C, YANG Y Tartaric acid-functionalized tetraphenylethylenes as fluorescent sensors for enantioselective discrimination of chiral analytes[J]. *Inorg. Chem. Commun.*, 2023,155:111055.
- [ 53 ] XU Z-R, GAO M-L, HU M, *et al.* Tetraphenylethylene dicycle helicates: circularly polarized luminescence and chiral recognition based on emission wavelength change[J]. *Sci. China Chem.*, 2024,67(11):3817-3824.
- [ 54 ] HU M, YE F-Y, DU C, *et al.* Hindered tetraphenylethylene helicates: chiral fluorophores with deep-blue emission, multiple-color CPL, and chiral recognition ability[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022,61(8):e202115216.
- [ 55 ] SHI Y, YIN G, YAN Z, *et al.* Helical sulfono- $\gamma$ -AApeptides with aggregation-induced emission and circularly polarized luminescence[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019,141(32):12697-12706.



贾文萱(2002-),女,山东淄博人,硕士研究生,2024年于烟台大学获得学士学位,主要从事手性超分子结构合成与组装的研究。

E-mail: wenxuan.jia@ruc.edu.cn



欧阳光辉(1987-),男,湖南新化人,理学博士,教授,博士生导师。2010年于中国科学技术大学获理学学士学位,2015年于中国科学院化学研究所获理学博士学位,主要从事手性 $\pi$ -共轭分子的合成、自组装手性纳米结构、超分子凝胶及手性光学材料的研究。

E-mail: ouyanggh@ruc.edu.cn