

基于杯[4]芳烃的手性 AIEgen 用于酸及氨基酸的对映选择性识别

马欢, 董世龙, 杨均成, 祝海涛, 冯海涛

(宝鸡文理学院化学与材料工程学院, AIE(聚集诱导发光)研究中心, 宝鸡 721013)

摘要 合成了两种基于杯[4]芳烃的手性 AIEgen, 该分子表现出显著的对映体选择性识别能力. 实验结果表明, 它们能够高效区分 12 种手性酸及氨基酸, 其中与 *D*-丝氨酸和 *L*-丝氨酸作用后, 体系的荧光强度比高达约 42, 展现出优异的手性识别性能. 采用扫描电子显微镜(SEM)对识别前后体系的形貌进行了表征, 发现不同对映体诱导形成了不同的形态结构, 揭示了手性依赖的组装行为与荧光响应之间的内在关联.

关键词 聚集诱导发光; 杯[4]芳烃; 手性识别

中图分类号 O623

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20260049

Chiral AIEgens Based on Calix[4]arene for Enantioselective Recognition of Acids and Amino Acids

MA Huan, DONG Shilong, YANG Juncheng*, ZHU Haitao*, FENG Haitao

(College of Chemistry and Materials Science, Baoji University of Arts and Sciences,
AIE(Aggregation-Induced Emission) Research Center, Baoji 721013, China)

Abstract Two chiral AIEgens derived from calix[4]arene were synthesized, which exhibited prominent enantioselective recognition capabilities. Experimental results demonstrated that these AIEgens could efficiently discriminate between 12 types of chiral acids and amino acids. Notably, upon interaction with *D*-serine and *L*-serine, the fluorescence intensity ratio of the system reached 42.0, indicative of exceptional chiral recognition performance. The morphologies of the systems before and after identification were characterized using scanning electron microscopy (SEM). It was found that different enantiomers induced distinct morphological structures, revealing the intrinsic relationship between the chiral-dependent assembly behavior and the fluorescence response.

Keywords Aggregation-induced emission; Calix[4]arene; Chiral recognition

手性是自然界中普遍存在的基本属性, 指一个物体或其分子结构不能与其镜像完全重叠的特性^[1,2]. 在分子水平上, 手性分子以一对对映体形式存在, 它们具有相同的物理化学性质, 但在光学活性上表现出差异. 手性在生命体系中扮演着关键角色, 例如, 生物大分子如蛋白质、核酸和糖类均具有特定手性构型, 而大多数药物、农用化学品和香料分子也呈现手性特征^[3-5]. 手性识别即区分对映体的过程, 是化学、药学、食品科学和生命科学领域的核心问题^[6-8]. 由于对映体可能表现出截然不同的

收稿日期: 2026-01-27. 网络首发日期: 2026-03-10.

联系人简介: 杨均成, 男, 博士, 讲师, 主要从事超分子大环主体合成及应用方面的研究. E-mail: yangjuncheng@bjwlxy.edu.cn

祝海涛, 男, 博士, 副教授, 主要从事炔丙醇化学构建碳环/杂环化合物、药物活性分子修饰及抗肿瘤研究和新型 AIE 分子合成与应用方面的研究. E-mail: zhuht@bjwlxy.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52173152)、陕西省青年科技新星项目(批准号: 2021KJXX-48)和陕西省科技创新团队(批准号: 2022TD-36)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52173152), the Fund of the Rising Stars of Shaanxi Province, China (No.2021KJXX-48), the Scientific and Technological Innovation Team of Shaanxi Province, China(No.2022TD-36).

生理活性、毒性或药代动力学特性,发展高效的手性识别方法对于不对称合成^[9,10]、手性分离^[11,12]、环境监测^[13,14]和生物传感^[15-17]至关重要。

目前报道的手性AIE荧光探针多依赖单一或有限的非共价相互作用,其对客体结构的适用范围仍然受限,且在水相或复杂体系中识别选择性和稳定性显著降低^[18-22]。超分子大环主体凭借预组织的限域空腔和多点协同作用,为构建高效手性识别体系提供了新的途径^[23-26]。环糊精^[27,28]、杯芳烃^[29,30]、柱芳烃^[31,32]及葫芦脲^[33]等大环分子能够通过尺寸匹配和多重弱相互作用放大主-客体结合中的手性差异。此外,将AIE发光单元引入超分子大环体系逐渐受到关注,大环限域效应可有效调控AIE聚集行为,使对映体诱导的聚集与微环境差异转化为显著不同的荧光响应,为发展高灵敏手性识别策略提供了新思路。

手性荧光探针通常包含发光团、手性源和结合单元3个基本组成部分^[34-36]。四苯基乙烯(TPE)作为典型的聚集诱导发光(AIE)基元,已被广泛用于构建多种AIE发光材料(AIEgens),其中包括具有手性识别功能的AIE活性受体。本研究在TPE骨架上引入*R/S*-1-环己二胺作为手性源及结合位点,并进一步通过共价键连接4-叔丁基杯[4]芳烃大环结构,以增强识别能力。基于手性胺与手性酸之间可能形成的氢键作用,预期该探针分子能够实现对映选择性识别手性酸性化合物。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

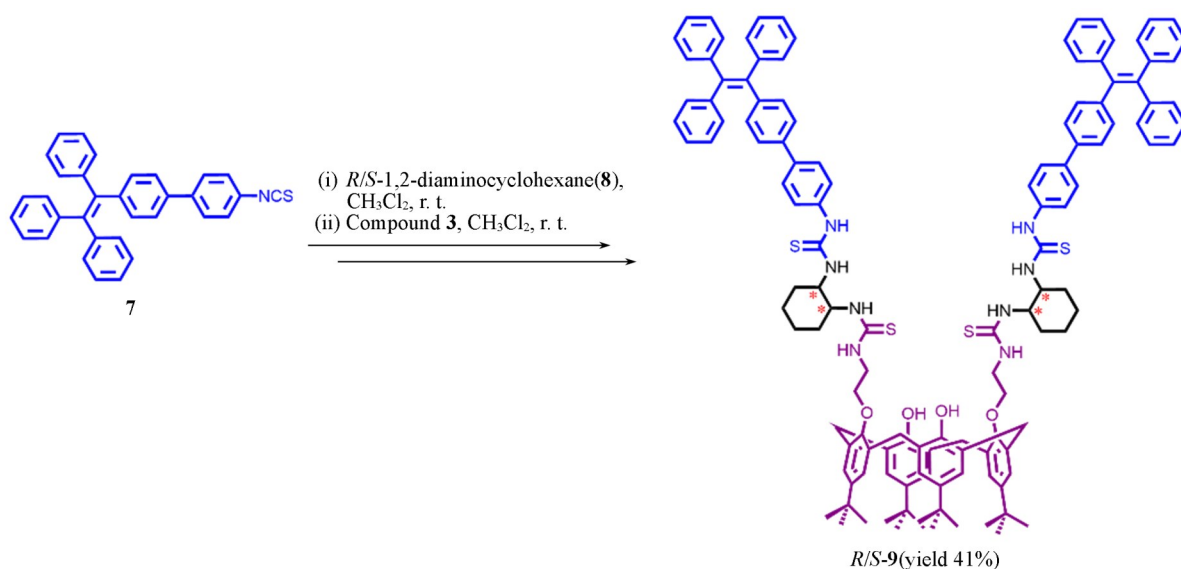
四氢呋喃购自安徽泽升科技股份有限公司,4-叔丁基杯[4]芳烃、氯乙腈、硫光气、4-氨基苯硼酸盐酸盐、四丁基氯化铵、碘化钠、碳酸钾、碳酸钡、氯化铝锂(1.0 mol/L in THF)、(1*R*,2*R*)-(-)-1,2-环己二胺、(1*S*,2*S*)-(-)-1,2-环己二胺、*D/L*-丝氨酸、*D/L*-缬氨酸、*D/L*-组氨酸、*D/L*-精氨酸、*D/L*-脯氨酸及*D/L*-半胱氨酸购自萨恩化学技术(上海)有限公司; *D/L*-*N*-Boc-丝氨酸、*D/L*-*N*-Boc-苯丙氨酸、*D/L*-*N*-Boc-丙氨酸、*D/L*-*N*-Boc-蛋氨酸、*R/S*-扁桃酸、*R/S*-氯扁桃酸以及*D/L*-酒石酸均购自上海麦克林生化科技股份有限公司。以上试剂均为分析纯。所有溶剂使用前未经预处理。

400-MR型全数字化核磁共振波谱仪(美国Agilent Technologies公司),MAX4型稳态/瞬态荧光光谱仪(法国HJY公司),T9S型紫外分光光谱仪(上海翱艺仪器有限公司),Quanta250 FEG型扫描电子显微镜(美国FEI公司)。

1.2 实验过程

参考文献^[37]方法合成中间体2,3,6和7,合成路线如Scheme S1(见本文支持信息)所示。探针*R*-9和*S*-9的合成路线如Scheme 1所示。

探针*R*-9的合成:在氮气氛围下,将化合物7(5.0 mmol, 2.33 g)的二氯甲烷溶液(30 mL)通过恒压滴液漏斗缓慢滴入装有(1*R*,2*R*)-(-)-1,2-环己二胺(5.0 mmol, 0.57 g,溶于10 mL二氯甲烷中)的250 mL三口圆底烧瓶中。反应混合物在室温下搅拌4 h。随后,用注射器将化合物3(2.4 mmol, 1.95 g)的二氯甲烷溶液(30 mL)注入反应体系,继续反应12 h。反应完成后,减压除去溶剂,粗产物通过硅胶柱色谱梯度洗脱纯化[V(石油醚)/V(乙酸乙酯)=6:1~3:1],得到目标产物*R*-9的黄色固体粉末(1.93 g,收率41%)。¹H NMR(400 MHz, DMSO-*d*₆), δ: 9.64(s, 2H), 8.47(s, 2H), 7.71~7.65(m, 6H), 7.48(d, *J*=8.4 Hz, 4H), 7.42(d, *J*=8.4 Hz, 4H), 7.37(d, *J*=8.0 Hz, 4H), 7.15~7.12(m, 17H), 7.07~7.05(m, 6H), 7.02~6.97(m, 17H), 4.21~4.17(m, 6H), 4.05(s, 8H), 3.38(d, *J*=12.8 Hz, 2H), 2.11~1.99(m, 6H), 1.62(s, 6H), 1.24~1.16(m, 26H), 1.05(s, 18H)。¹³C NMR(100 MHz, DMSO-*d*₆), δ: 179.54, 149.70, 149.24, 147.15, 143.19, 143.17, 143.10, 141.92, 141.56, 140.66, 140.10, 138.43, 137.40, 134.76, 133.18, 133.10, 131.25, 130.71, 130.63, 127.83, 127.78, 127.74, 127.59, 126.54, 126.47, 125.71, 125.37, 125.22, 122.89, 74.13, 57.08, 43.06, 33.87, 33.53, 31.44, 31.32, 31.23, 31.19, 30.88, 30.80, 24.31。ESI⁺ HRMS, *m/z* calcd. for C₁₂₈H₁₃₆N₈O₄S₄: 1976.9567 [M+Na]⁺; found: 1999.9456。核磁共振波谱图见本文支持信息图S1~图S3。



Scheme 1 Synthetic route of *R/S*-**9**

探针 *S*-**9** 的合成方法与 *R*-**9** 相同: ¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆), δ: 9.69 (s, 2H), 8.54 (s, 2H), 7.73~7.68 (m, 6H), 7.49 (d, *J*=8.1 Hz, 4H), 7.43 (d, *J*=7.8 Hz, 4H), 7.37 (d, *J*=7.4 Hz, 4H), 7.10~7.06 (m, 24H), 7.05~6.92 (m, 18H), 4.20 (s, 6H), 4.05 (s, 8H), 3.40 (s, 2H), 2.07 (s, 6H), 1.61 (s, 6H), 1.16 (s, 26H), 1.06 (s, 18H). ¹³C NMR (100 MHz, DMSO-*d*₆), δ: 179.53, 149.74, 149.25, 147.23, 143.25, 143.22, 143.16, 141.97, 141.61, 140.69, 140.13, 138.45, 137.44, 133.27, 133.18, 131.33, 130.78, 130.70, 127.90, 127.85, 127.80, 126.57, 125.43, 122.89, 74.18, 57.17, 43.13, 33.93, 33.59, 31.37, 30.85, 24.33. ESI⁺ HRMS, *m/z* calcd. for C₁₂₈H₁₃₆N₈O₄S₄: 1976.9567 [M+H]⁺; found: 1977.9644. 核磁共振波谱图见本文支持信息图 S4~图 S6.

2 结果与讨论

2.1 光物理性质

在确认 *R/S*-**9** 的分子结构后, 对其光物理性质进行了研究. 由于 TPE 及其衍生物多数具有聚集诱导发光 (AIE) 特性, *R/S*-**9** 在四氢呋喃 (THF) 溶液中的吸收光谱在 330 nm 处出现最大吸收峰, 主要归因于局域 π - π^* 跃迁 [图 1(A)]. 以波长 330 nm 的光激发时, *R*-**9** 在 THF 溶液仅呈现微弱荧光, 推测是由于分子内运动促使激发态能量经非辐射跃迁途径耗散所致. 当溶剂中的水含量 (体积分数) 增至 60% 以上时, 荧光逐渐增强, 这归因于不良溶剂比例增加导致化合物溶解度下降、发生聚集, 从而限制分子内运动, 使能量以辐射跃迁形式释放. 在水含量为 95% 的混合溶剂中, *R*-**9** 在 480 nm 处均显现强烈的蓝色荧光 [图 1(B) 和 (C)]. *S*-**9** 也具有相似现象 [图 1(D) 和 (E)]. *R*-**9** 和 *S*-**9** 在固态下的量子产率 (QY) 分别达 30.7% 和 28.6%. 此外, 在 THF 中测得的圆二色光谱显示, *R*-**9** 在 375~275 nm 范围内出现负 Cotton 效应宽谱带, 而 *S*-**9** 则呈现强度相近的正 Cotton 效应 [图 1(F)]. *R*-**9** 和 *S*-**9** 在二氯乙烷 (DCE) 中测得的 CD 信号与在 THF 中相反, 这表明其手性光学性质可能具有溶剂依赖性 (图 S7, 见本文支持信息). 以上结果表明, *R/S*-**9** 为典型的手性 AIE 分子.

2.2 对映体选择性识别

为考察 *R/S*-**9** 的对映体选择性识别能力, 以 *R*-**9** 荧光探针为例, 在 THF/水的混合溶剂体系中评估了对多种手性酸及氨基酸的识别性能. 如图 2(A) 所示, *R*-**9** 对 *L*-丝氨酸表现出显著的对映选择性识别行为; 加入 *D*-丝氨酸的体系保持澄清, 仅呈现微弱荧光; 而加入 *L*-丝氨酸后体系出现浑浊, 并伴随强烈的荧光发射, 两者荧光强度比达到 42.0, 显示出优异的对映体识别能力. 尽管未保护的 α -氨基酸因其两性离子特性在常规有机溶剂中溶解度较低, 对手性识别构成挑战, 但实验发现 *R*-**9** 仍可诱导多种

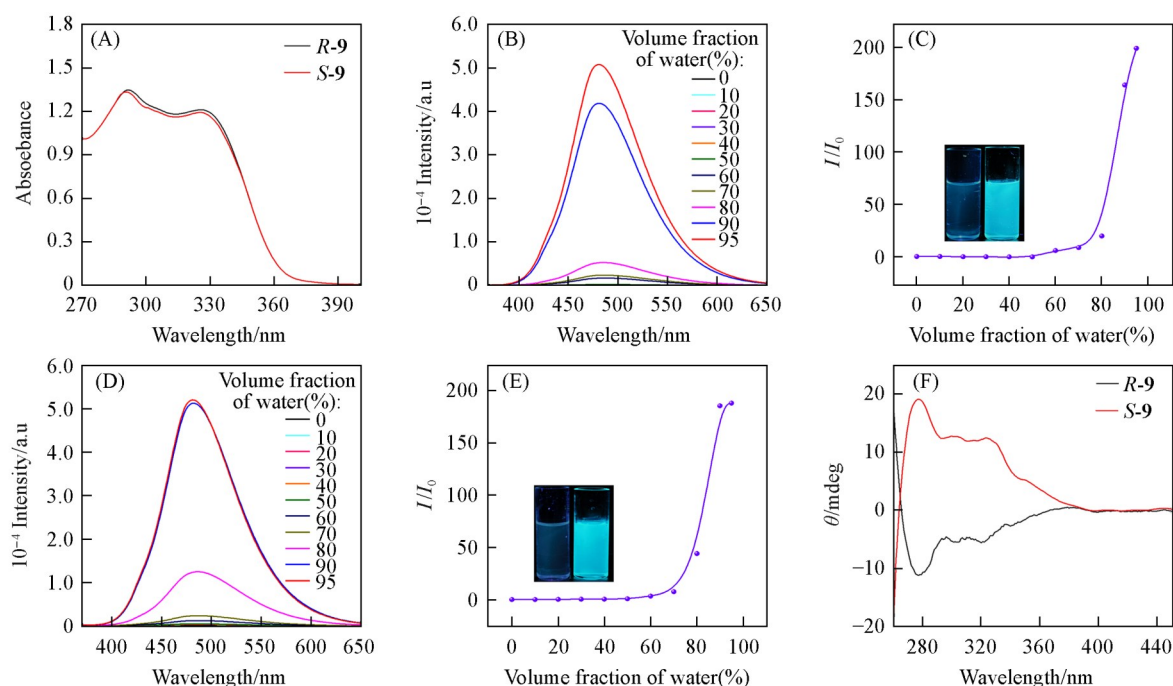


Fig. 1 Absorption spectra of *R*-9 and *S*-9 in THF(A), PL spectra of *R*-9(B) and *S*-9(D) in THF and THF/water mixture with different volume fraction of water, fluorescence intensity ratio of *R*-9(C) and *S*-9(E) at 480 nm in different THF/water mixture(*I*) to that in pure THF(*I*₀), and CD spectra of *R*-9 and *S*-9 in THF(F)

(B), (D) [*R*-9]= 1.0×10^{-5} mol/L, [*S*-9]= 1.0×10^{-5} mol/L. λ_{ex} =330 nm, ex/em slits 1/1 nm. (E) [*R*-9]=[*S*-9]= 1.0×10^{-4} mol/L.

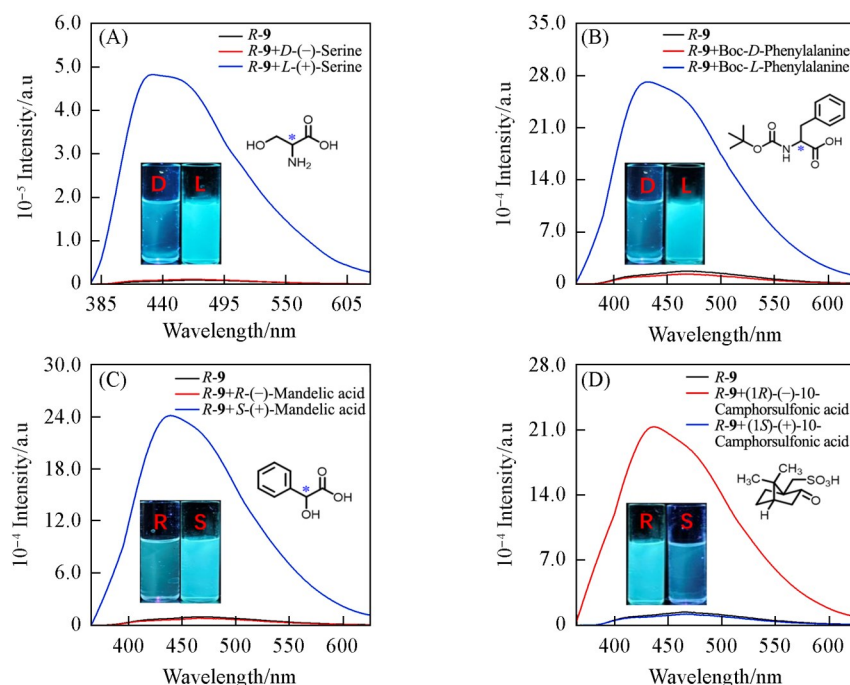


Fig. 2 PL spectra of *R*-9 and the mixtures of *R*-9 and *D/L*-serine(A), *R*-9 and *N*-Boc-*D/L*-phenylalanine(B), *R*-9 and *R/S*-mandelic acid(C) and *R*-9 and *R/S*-camphor sulfonic acid(D) in THF and water mixture

Volume fraction of water =36.36%, [*R*-9]=[*S*-9]= 4.54×10^{-4} mol/L, λ_{ex} =330 nm, ex/em slits 1/1 nm.

(A) I_L/I_D =42.0; (B) I_L/I_D =19.6. (C) I_S/I_R =28.9. (D) I_R/I_S =20.0.

α -氨基酸的某一对映体发生特异性聚集并产生明显荧光增强, 而对另一对映体响应微弱. 其对缬氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸及半胱氨酸的对映体荧光强度比分别为 13.5, 12.0, 4.6 和 2.7 (表 1, 对应的荧光光谱见本文支持信息图 S8 和 S9); 其次, 对保护的 α -氨基酸也有明显的识别效果, *R-9* 对 *N*-Boc-*L*-苯丙氨酸作用后荧光强度显著增强, 有明显的识别效果, 但对 *N*-Boc-*D*-苯丙氨酸没有明显的识别作用, 两者强度比为 19.6 [图 2(B)]. *R-9* 对 *N*-Boc-*D/L*-丙氨酸和 *N*-Boc-*D/L*-蛋氨酸的对映体识别的荧光强度比分别为 32 和 5.1 (表 1), 对应的荧光光谱见本文支持信息图 S10.

Table 1 Enantioselective recognition of chiral acids and amino acids by *R/S-9**

| Entry | Analytes | Structure | I_1/I_2 | State | Solvent |
|-------|-----------------------------|-----------|---------------------|---------|---|
| 1 | Serine | | 42.0 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 2 | Valine | | 13.5 (<i>D/L</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 3 | Histidine | | 12.0 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 4.35×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 2:5) |
| 4 | Arginine | | 4.6 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 3.85×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 19:50) |
| 5 | Proline | | 2.7 (<i>D/L</i>) | Pre/Sol | 4.35×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 6 | <i>N</i> -Boc-Phenylalanine | | 19.6 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 7 | <i>N</i> -Boc-Alanine | | 32.0 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 8 | <i>N</i> -Boc-Methionine | | 5.1 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 9 | Mandelic acid | | 28.9 (<i>S/R</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 10 | Camphor sulfonic acid | | 20.0 (<i>R/S</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 11 | 2-Chloromandelic acid | | 3.9 (<i>R/S</i>) | Pre/Sol | 4.54×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 9:25) |
| 12 | Tartaric acid | | 2.1 (<i>L/D</i>) | Pre/Sol | 4.63×10^{-4} mol/L in THF/H ₂ O (volume ratio 7:20) |

* Abbreviations: Pre, precipitates; Sol, solution.

此外, *R-9* 对扁桃酸和樟脑磺酸的对映体也表现出良好的区分能力, 两种构型诱导的荧光强度比分别为 28.9 和 20 [图 2(C) 和 (D)]. 进一步研究表明, 该探针还可高选择性地识别其它手性酸, 包括 *R/S*-氯扁桃酸 ($I_S/I_R=3.9$) 以及 *D/L*-酒石酸 ($I_L/I_D=2.1$) (表 1), 对应的荧光光谱见本文支持信息图 S11.

2.3 对映体选择性识别机理分析

为探究对映体选择性识别机制, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 对组装过程中特定阶段的悬浊液和溶液形貌进行了表征. 首先, 考察了 AIEgen 分子 *R-9* 与 *S-9* 在不同溶剂中的自组装行为. 在纯 THF 中, 二者均形成了片层状的纳米结构 (图 S12, 见本文支持信息). 当 THF 中水含量 (体积分数) 增加到 95% 时, 体系变为悬浊液, 其形貌转变为大量尺寸均一的纳米球 (图 S13, 见本文支持信息), 这表明溶剂极性对组装形貌具有关键调控作用. 在此基础上, 进一步研究了 *R-9* 与手性氨基酸的复合组装体形貌. 如图 3(A) 和 (B) 所示, 在相同的混合溶剂中, *R-9* 自身组装形成的片层结构边缘附着生长出许多尺寸均一

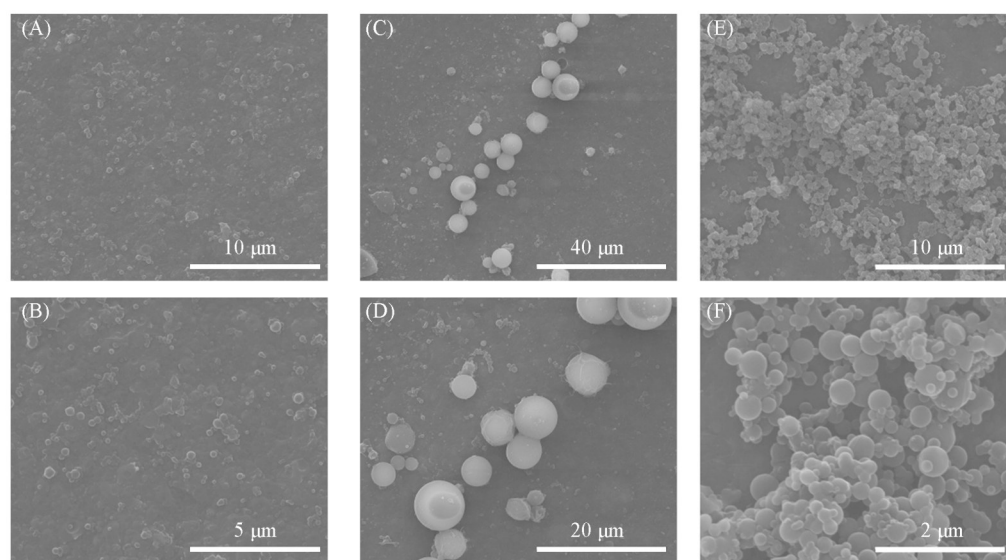


Fig. 3 SEM images of the suspension formed by *R*-9(A, B), the solution generated by *R*-9 and *D*-serine(C, D) and the solution generated by *R*-9 and *L*-serine(E, F) in THF/H₂O(volume ratio 9:25) [*R*-9]=4.54×10⁻⁴ mol/L.

的纳米球。当 *R*-9 与 *D*-丝氨酸相互作用后，混合物形成了大量尺寸在 5~8 μm、且相对分散的囊泡结构 [图 3(C) 和 (D)]。 *R*-9 与 *L*-丝氨酸的混合物则形成悬浊液，呈现出许多相互粘连的纳米球 [图 3(E) 和 (F)]。以上结果表明，具有合适立体构型的 *D*-丝氨酸能与 *R*-9 更好地匹配，诱导其形成有序的组装结构，进而通过 AIE 效应实现对映体选择性识别。为了验证这一猜想，通过 SEM 观察了 *R*-9 与 *R/S*-樟脑磺酸的组装形貌。 *R*-9 与 *R*-樟脑磺酸的溶液主要由许多分散的纳米球组成，其荧光较弱。与之形成鲜明对比的是， *R*-9 与 *S*-樟脑磺酸的体系则形成了大量中空且近似球形的结构，这些结构发生明显团聚，并伴随着强烈的荧光发射 (图 S14，见本文支持信息)。该结果进一步证实，手性酸的立体构型能显著影响其与 AIEgen 的主客体组装模式，从而直接调控聚集态结构与发光性能。

3 结 论

合成了两种基于杯[4]芳烃的手性 AIEgen 分子，在 THF/水混合体系中实现了对 12 种手性酸及氨基酸的对映体选择性识别，特别是与 *D/L*-丝氨酸作用时表现出高达约 42 的荧光强度比，显示出优异的手性识别能力。通过扫描电子显微镜研究了识别前后体系的形貌变化，阐明了对映体选择性荧光识别与聚集态结构调控之间的内在关联。本文工作可为发展具有高灵敏度与高选择性的手性荧光传感体系提供参考。

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20260049>。

参 考 文 献

- [1] Hu M., Feng H. T., Yuan Y. X., Zheng Y. S., Tang B. Z., *Coord. Chem. Rev.*, **2020**, *416*, 213329
- [2] Calcaterra A., D' Acquarica I., *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **2018**, *147*, 323–340
- [3] Alvarez-Rivera G., Bueno M., Ballesteros-Vivas D., Cifuentes A., *Trend. Anal. Chem.*, **2020**, *123*, 115761
- [4] Ito T., Handa H., *Congenit. Anom.*, **2012**, *52*(1), 1–7
- [5] Saha D., Kharbanda A., Yan W., Lakkaniga N. R., Frett B., Li H. Y., *J. Med. Chem.*, **2019**, *63*(2), 441–469
- [6] Efimov A. V., *Biochemistry (Moscow)*, **2018**, *83*, 103–110
- [7] Tan X. P., Wu H. W., Wang D. D., Zhang J., Zhang J. H., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, *46*(2), 20240352 (谭晓萍, 吴宏伟, 王丹丹, 张金, 章俊辉. 高等学校化学学报, **2025**, *46*(2), 20240352)
- [8] Bai L., Huo S. H., Chen J., Lu X. Q., *Chem. J. Chinese Universities*, **2019**, *40*(1), 41–46 (白蕾, 霍淑慧, 陈晶, 卢小泉. 高等学校化学学报, **2019**, *40*(1), 41–46)

- [9] Xu H., Lin Z., Bai J., Guo Y., Ma S., *ACS Catal.*, **2023**, *14*(1), 262—270
- [10] Ye F. Y., Hu M., Zheng Y. S., *ACS Appl. Mater. Int.*, **2023**, *15*(35), 42056—42065
- [11] Qi C. X., Wei K. Y., Li Q. Y., Li Y., Su X. L., Yang J. C., Tian J., Chen P., Feng H. T., Tang B. Z., *Aggregate*, **2022**, *4*(3), e299
- [12] Wang X., Xiang S., Qi C. X., Chen M., Su X., Yang J. C., Tian J., Feng H. T., Tang B. Z., *ACS Nano*, **2022**, *16*(5), 8223—8232
- [13] Liu J., Su X., Xu Y., Tang W., Gong J., *Sensor Actuat. B-Chem.*, **2025**, *429*, 137277
- [14] Zhang Y., Wang H. Y., He X. W., Li W. Y., Zhang Y. K., *J. Hazard. Mater.*, **2021**, *412*, 125249
- [15] Qi C. X., Li Q. Y., Wei K. Y., Zhao W., Zhang W., Chen M. M., Zhang X., Feng H. T., *Dyes Pigments*, **2025**, *239*, 112781
- [16] Chen M., Qi C. X., Yin Y. T., Lv P., Xiang S., Tian J., Feng Z. J., Feng H. T., Tang B. Z., *Org. Chem. Front.*, **2022**, *9*(19), 5160—5167
- [17] Wang J., Meng Q., Yang Y., Zhong S., Zhang R., Fang Y., Gao Y., Cui X., *ACS Sens.*, **2022**, *7*(9), 2521—2536
- [18] Chen P., Lv P., Guo C. S., Wang R. P., Su X., Feng H. T., Tang B. Z., *Chin. Chem. Lett.*, **2023**, *34*(6), 108041
- [19] Feng H. T., Yuan Y. X., Xiong J. B., Zheng Y. S., Tang B. Z., *Chem. Soc. Rev.*, **2018**, *47*(19), 7452—7476
- [20] Qu H., Wang Y., Li Z., Wang X., Fang H., Tian Z., Cao X., *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*(50), 18142—18145
- [21] Zhang X., Yu Q., Chen S., Dai Z., *New J. Chem.*, **2018**, *42*(6), 4045—4051
- [22] Li Y., Yu K., Xu Z., Zeng J., Wei J., Jiang H., Zhu Y., Gu S., Ma X., *Nat. Commun.*, **2026**, *17*(1), 96
- [23] Sun M. X., Ni C. Z., Zhang F. Q., Zhu Y. Y., Zeng J., Gu S. X., *Chin. Chem. Lett.*, **2023**, *34*(12), 108345
- [24] Zhao L., Cheng L., Yang Y., Wang P., Tian P., Yang T., Nian H., Cao L., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*(25), e202405150
- [25] Wang Y., Liao Q., Feng Y., Meng Q., *J. Mol. Struct.*, **2024**, *1304*, 137695
- [26] Duan H., Yang T., Li Q., Cao F., Wang P., Cao L., *Chin. Chem. Lett.*, **2024**, *35*(1), 108878
- [27] Chen L., Chen Y., Zhang Y., Liu Y., *Angew. Chem. Inter. Ed.*, **2021**, *60*(14), 7654—7658
- [28] Che Y., Li K., Xie C., Sun F., Yuan Y., Zhao X., Zhao C. X., Chang G., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, *35*(36), 2506753
- [29] Xiang S., Lv P., Guo C., Qi C. X., Yang J. C., Tian J., Yang D. S., Feng H. T., Tang B. Z., *Chem. Commun.*, **2021**, *57*(98), 13321—13324
- [30] Yang F. M., Luo J., Chen Y. C., Chung W. S., *Synthesis*, **2023**, *55*(17), 2786—2796
- [31] Xue Y., Zeng Y., Shi Y., Tian Y., Sun C., Zhang N., Zheng X., Chen P., *Sci. China Chem.*, **2025**, *68*(7), 3100—3107
- [32] Liang B., Cheng Y., Liu X., Jia L., Wei X., Zheng Q., Wang P., Xia D., Yan X., *Sci. China Chem.*, **2024**, *67*(10), 3373—3381
- [33] Su T., Yang M., Wang S., Song Y. Y., Gao Z., Zhao C., *Anal. Chem.*, **2025**, *97*(39), 21660—21667
- [34] Li D., Yu X., Chen S., Fan C., Chi W., Dong Q., Zeng C., *Talanta*, **2025**, *293*, 128023
- [35] Zhang Y. X., Zhang F. Q., Peng A. P., Jiang T., Meng Y. X., Li Y., Gu S. X., Zhu Y. Y., *Chin. Chem. Lett.*, **2026**, *37*(1), 111500
- [36] Zhang L., Zhang K., Wu M., Ding J., Feng M., Li X., Yang S., Ma H., *Anal. Chem.*, **2025**, *97*(6), 3344—3351
- [37] Yang J. C., Dong S. L., Ding Y. C., Qi C., Feng H. T., *Chem. Commun.*, **2025**, *61*(53), 9654—9657

(Ed.: F, K, M)