

三取代烯烃型聚集诱导发光分子的设计、合成与应用

陈兆华 曹西颖 陈思鸿 宇世伟
林燕兰 林舒婷 汪朝阳*

(华南师范大学化学学院 教育部环境理论化学重点实验室 广州市生物医学分析化学重点实验室 广东省药品监督管理局手性药物过程控制与质量评价重点实验室 广州 510006)

摘要 聚集诱导发光(AIE)现象的发现开创了有机发光材料研究的新里程与新局面. AIE 分子的研究广受关注, 其中三取代烯烃型 AIE 分子作为近年来新出现的结构类型, 它们的设计、合成与应用的进展也颇为显著. 鉴于此, 根据近年合成的三取代烯烃型 AIE 分子所连接的取代基的结构特点, 将其细分为三芳(杂环)基取代的烯烃型 AIE 分子、双键相连氰基的三取代烯烃型 AIE 分子和双键相连杂原子的三取代烯烃型 AIE 分子三大类, 重点综述了其分子作用机制, 以及在有机发光材料、荧光探针等领域的应用, 并对三取代型 AIE 分子的未来设计进行了展望.

关键词 聚集诱导发光(AIE); 三取代烯烃; 设计与合成; 分子作用机制; 有机发光材料; 荧光探针

Design, Synthesis and Application of Trisubstituted Olefinic Aggregation-Induced Emission Molecules

Chen, Zhaohua Cao, Xiying Chen, Sihong Yu, Shiwei
Lin, Yanlan Lin, Shuting Wang Zhaoyang*

(School of Chemistry, South China Normal University; Key Laboratory of Theoretical Chemistry of Environment, Ministry of Education; Guangzhou Key Laboratory of Analytical Chemistry for Biomedicine; GDMPA Key Laboratory for Process Control and Quality Evaluation of Chiral Pharmaceuticals, Guangzhou 510006)

Abstract The discovery of aggregation-induced emission (AIE) has created a new milestone and new situation in the research of organic luminescence materials. The research on AIE molecules has attracted enormous attention. Among them, trisubstituted olefinic AIE molecules, as new structural types in recent years, have made remarkable progress in their design, synthesis and application. In view of this, according to the structural characteristics of the substituents attached to the carbon-carbon double bond, these trisubstituted olefinic AIE molecules synthesized in recent years are divided into three categories: olefinic AIE molecules substituted (a) by multiple aryl rings, (b) by cyano group(s) and (c) by heteroatoms. As this classification, their molecular mechanisms and applications in the field of organic luminescence materials and fluorescent probes are reviewed, and the future design of the trisubstituted AIE molecules is also prospected.

Keywords aggregation-induced emission (AIE); trisubstituted olefins; design and synthesis; molecular mechanism; organic luminescence materials; fluorescent probes

自聚集诱导发光(Aggregation-Induced Emission, AIE)的概念由唐本忠课题组于 2001 年提出以来^[1], AIE 分子在有机发光半导体(OLED)显示、照明材料、光波导材料、传感材料和生物成像等领域中都有重要的应用^[2-4]. 目前报道的 AIE 分子的核心结构^[5-6], 通常为多芳基取代杂环(如噻咯^[1,2,7-8]、吡咯^[2]等)化合物、二苯乙

烯基蒽(DSA)衍生物^[2,9]和四苯乙烯(TPE)衍生物^[2,8,10]等. 其中, 作为四取代烯烃的 TPE 骨架, 因其具有易于合成与修饰、能有效地增强 AIE 效应等特点而成为“明星”, 使大部分 AIE 分子以四取代烯烃为骨架进行构建^[10]. 但事实上, 越来越多的三取代烯烃也作为重要的 AIE 分子开始被关注^[10-13], 甚至一些基于碳氮双键的三取代

* Corresponding author. E-mail: wangzy@senu.edu.cn

Received March 15, 2022; revised April 22, 2022; published online May 6, 2022.

Project supported by the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2021A1515012342), and the Guangdong Provincial Science and Technology Project (No. 2017A010103016).

广东省基础与应用基础研究基金(No. 2021A1515012342)、广东省科技计划(No. 2017A010103016)资助项目.

子^[14-16]近来也被发现具有 AIE 性质. 然而, 对于三取代烯烃型 AIE 分子的构建, 国内外尚无综述报道. 鉴于此, 本文按照三取代烯烃型 AIE 分子所连接的取代基的结构特点, 对近年来基于三取代烯烃的 AIE 分子的设计、合成与应用进展进行了综述.

1 三芳(杂环)基取代的烯烃型 AIE 分子

DSA(化合物 **1**, 图 1)作为一种常见的 AIE 骨架, 其中多个苯基通过可旋转的 C-C 键与蒽核进行连接, 若在蒽核和外围基团之间引入具有较大空间位阻的功能性基团, 由于分子内旋转受限(RIR)导致 DSA 骨架从共轭平面到非平面结构扭曲变形, 可以衍生出许多具有 AIE 特性和独特功能的 DSA 衍生物^[9]. 因此, 若在 DSA 骨架中适当引入更多苯基, 合成三取代的 DSA 衍生物, 也会获得具有 AIE 性质的分子(化合物 **2**, 图 1)^[17].

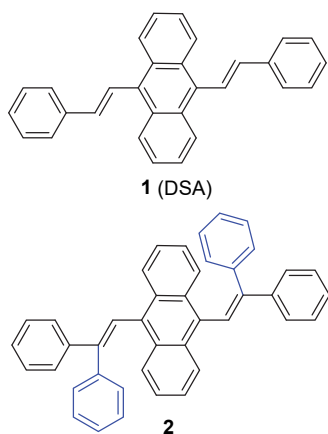


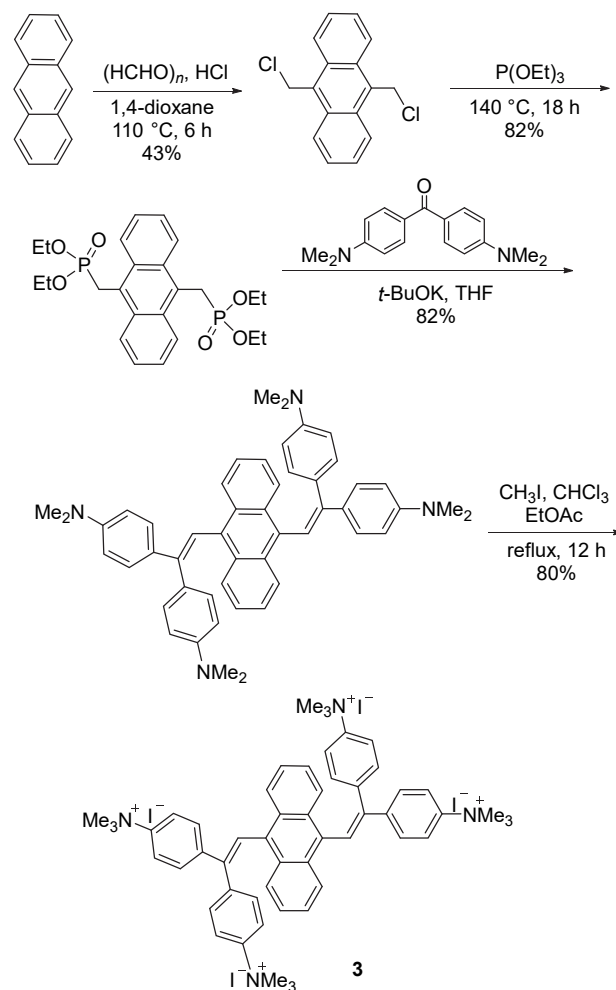
图 1 DSA 及其衍生物结构

Figure 1 Structures of DSA and its derivative

最近欧阳津课题组^[18]以蒽核为起始原料, 合成了新型水溶性三取代的 DSA 衍生物 **3** (Scheme 1), 其不仅是一种具有 AIE 性质的分子, 也具有较好的自组装效果和较高的生物相容性. 化合物 **3** 与天然胰岛素和纤维胰岛素相互作用时可以产生不同的荧光信号, 其机理是通过疏水相互作用, 结合到富含 β 片结构的纤维状胰岛素的疏水区域, 从而限制了 **3** 的分子内旋转, 并实现了其显著的荧光发射^[18-19].

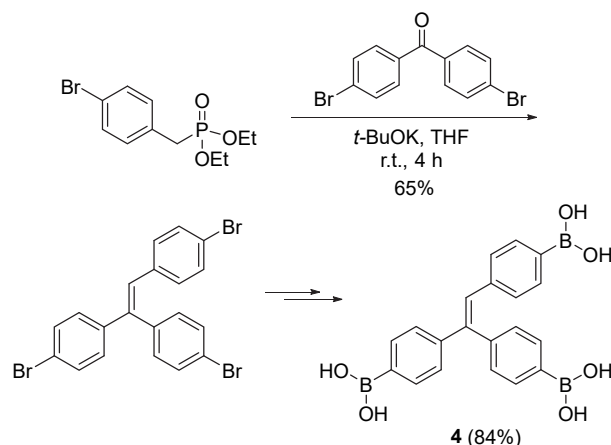
其实, AIE 分子的生物传感器应用一直是研究热点^[20]. 唐本忠课题组^[21]合成了可作为活细菌检测的 AIE 荧光探针分子 **4** (Scheme 2). 其中, 三芳基取代烯烃型 AIE 分子的关键合成步骤, 是以 4-溴苄基亚磷酸乙酯和 4,4'-二溴二苯甲酮为原料进行 Wittig-Horner 反应.

在国外, 印度 Iyer 课题组^[22]以 4-溴苄基亚磷酸二乙酯和二苯甲酮为原料, 通过 Wittig-Horner 反应合成了三芳基取代的烯烃 **5**, 其继续与 4-吡啶硼酸发生 Suzuki 偶



图式 1 化合物 **3** 的合成路线

Scheme 1 Synthetic route of compound **3**

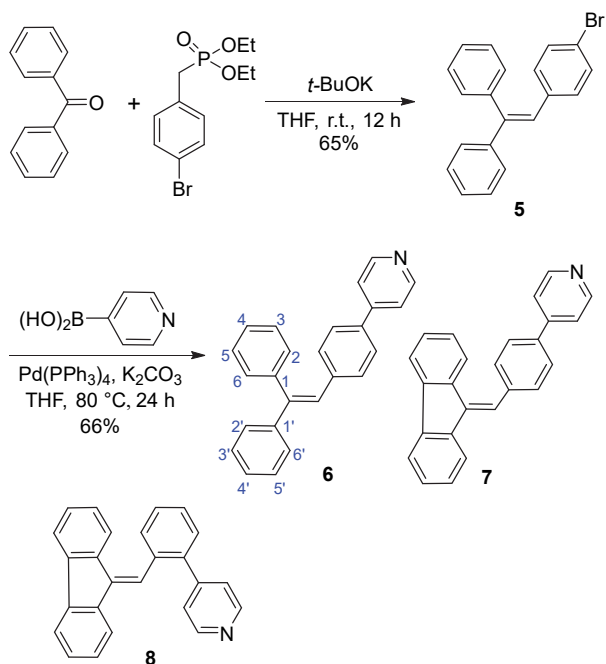


图式 2 化合物 **4** 的合成路线

Scheme 2 Synthetic route of compound **4**

联反应, 也能合成具有 AIE 性质的化合物 **6** (Scheme 3). 有趣的是, Iyer 课题组还发现, 如果将 **6** 的两个苯环上 6 号 C 和 2'号 C 用碳碳单键连接起来, 则得到的产物 **7** (Scheme 3)是一个聚集荧光猝灭(ACQ)分子; 但若 **7** 中吡啶环不是在苯环的对位, 而是在邻位上, 则所得的化

合物 **8** (Scheme 3) 又是一个 AIE 分子. 这是因为化合物 **6** 和 **8** 的苯环和吡啶之间的扭转二面角较大, 能够有效阻止分子的 π - π 共面堆积; 而 **7** 的苯环和吡啶之间的扭转二面角较小, 无法阻止分子结构中的 π - π 堆积, 会引起聚集猝灭. 可见, 即使是同分异构体, 分子结构的细微差别也会影响分子的 AIE 性质.



图式 3 化合物 **6** 的合成路线及化合物 **7**、**8** 的结构

Scheme 3 Synthetic route of compound **6**, and the structure of compounds **7** and **8**

值得注意的是, 如果在苯环上桥连稠杂环, 特别是咔唑环, 同样可以达到构建 AIE 分子的目的. 在这方面, 国内课题组进行了比较丰富的研究, 如许家瑞课题组^[23]合成的化合物 **9**、唐本忠课题组^[24-25]合成的化合物 **10** 和 **11** (图 2), 它们的 AIE 性质均归因于 RIR. 其中, **11** 是 AIE-TADF (Thermally activated delayed fluorescence) 型协同分子, 具有作为 TADF 发射体的高潜力. TADF 材料可实现单线态和三线态激子的全利用^[26], 能开发高效的非掺杂器件^[25,27].

2 双键相连羰基的三取代烯烃型 AIE 分子

羰基结构简单, 具有刚性的结构, 容易与相邻基团产生空间位阻形成扭曲的构象^[2], 从而阻断分子间的 π - π 堆积, 引起 AIE 效应^[28]. 目前, 基于连有芳基的羰基乙烯骨架, 人们已经开发出大量的三取代烯烃型 AIE 分子. 根据分子中所连接取代芳基的稠合程度, 将双键相连羰基的三取代烯烃型 AIE 分子划分为单环芳基和稠环芳基两类.

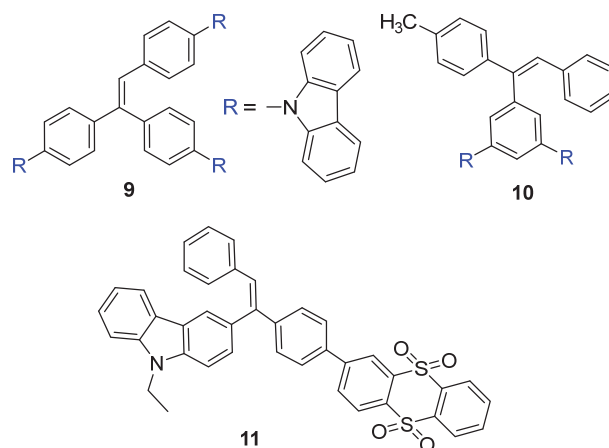


图 2 化合物 **9**~**11** 的结构

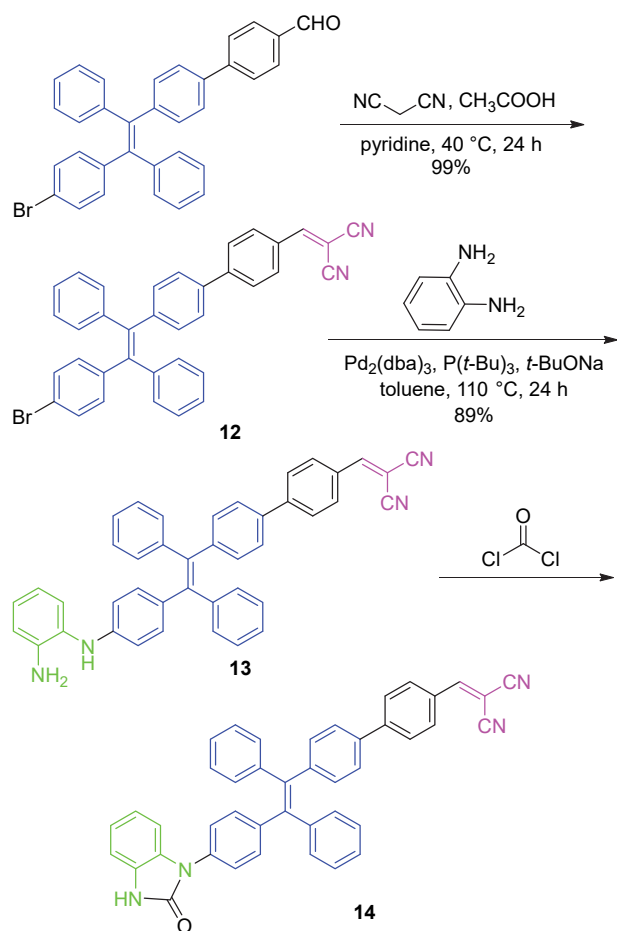
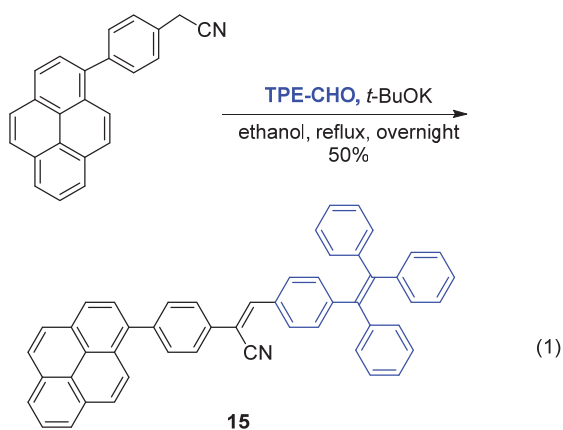
Figure 2 Structure of compounds **9**~**11**

2.1 由单环芳基和羰基取代的三取代烯烃型 AIE 分子

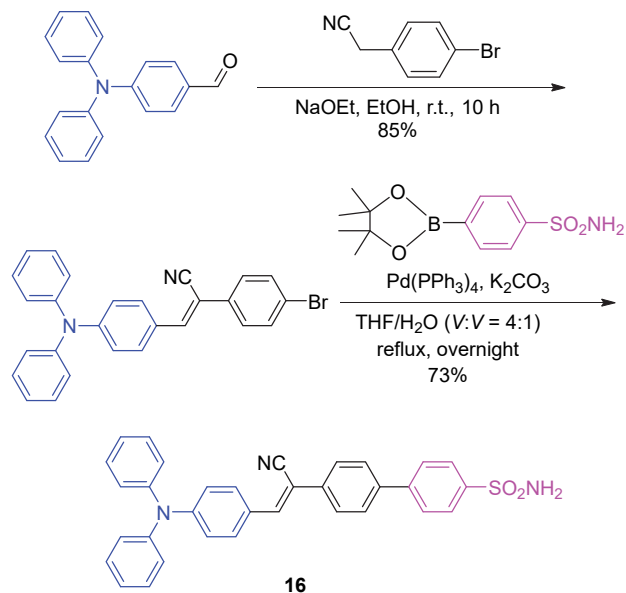
丙二腈与芳香醛的 Knoevenagel 缩合反应, 是合成含一个单环芳基、二个羰基取代的三取代烯烃型 AIE 分子最常见的方法^[29-30]. 其中, 单环芳基可以是芳杂环^[31], 但更常见的是苯环^[32]. 例如, 吴水珠课题组^[33]以含有 TPE 结构单元的芳香醛与丙二腈发生 Knoevenagel 缩合反应合成了化合物 **12**, 其再引入邻苯二胺结构得到便携探针 **13** (Scheme 4). 化合物 **13** 本身发射出蓝色荧光, 和光气分子反应生成 **14** 后发射峰红移, 荧光发射变为绿色, 故可通过荧光颜色的变化实现可视化检测光气. 其实, 这类含单环芳基和二羰基取代的三取代烯烃型 AIE 分子, 不仅可以应用于荧光探针^[34], 还能应用于光动力癌症治疗^[31,35]等领域.

有趣的是, 若二羰基乙烯骨架中的一个羰基被芳环取代, 得到羰基乙烯骨架, 仍然能构建出许多 AIE 分子^[36]. 此时, 构建 AIE 分子的核心反应, 是芳基乙腈与芳香醛的 Knoevenagel 缩合反应^[37]. 其中, 鉴于 TPE 是典型的 AIE 单元, 其常被引入分子中以构建 AIE 分子^[38]. 因此, 利用含有 TPE 结构的芳香醛与芳基乙腈反应, 是将 TPE 单元引入 AIE 分子的主要途径^[39]. 例如, 近来唐本忠课题组^[40]以醛基与 TPE 相连的 TPE-CHO 为原料, 合成了探针 **15** (Eq. 1). 含有 **15** 的荧光油墨在低浓度的不同基质上会表现出更好的打印能力, 使得该 AIE 分子可以应用于防伪墨水.

事实上, 除了 TPE^[41], 具有特殊螺旋桨状分子结构和良好供电子能力的三苯胺(TPA), 也被认为是构建 AIE 荧光团的良好供体^[42]. 鉴于其具有大斯托克斯位移、高荧光量子产率以及良好光稳定性等优点^[43], 将其引入羰基乙烯骨架中得到的 AIE 分子不仅可应用于生物成像^[44], 而且还可应用为温度、压力传感材料^[45]. TPA 型含羰基、芳基的三取代烯烃 AIE 分子的合成方法和

图式 4 探针 **13** 的合成路线与作用原理Scheme 4 Synthetic route of compound **13** and its detection mechanism图式 5 化合物 **16** 的合成路线Scheme 5 Synthetic route of compound **16**

成了 AIE 探针 **16** (Scheme 5). **16** 具有显著的光稳定性, 其中 TPA 片段被用作电子供体(D)和转子, 而苯基磺酰胺单元与环氧合酶有很强的结合能力, 故其对高尔基体有靶向特异性而可应用于生物体中的特异性成像。



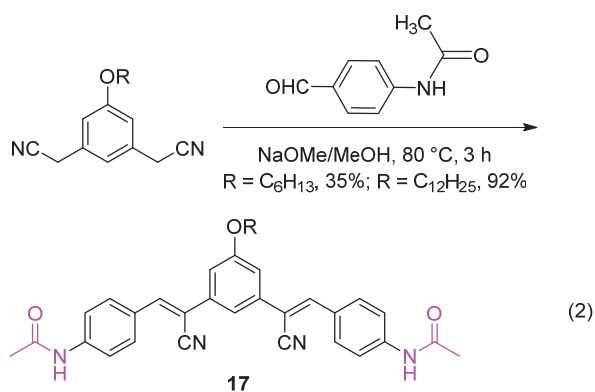
当用不同的官能团修饰苯环时, 所得的 AIE 分子具备不同的应用^[50], 特别是应用于各种探针领域^[51]. 例如, Mishra 课题组^[52]通过构建末端含有能与 CO_2 结合的叔胺基的 AIE 荧光分子, 其分子聚合体可实现对 CO_2 的双峰检测。

凝胶类材料因其在药物传输和传感器等领域中的潜在应用受到广泛关注^[53-54], 但有机凝胶的研究较少. 最近, 西班牙 García-Martínez 课题组^[55]以二腈和带有乙酰氨基结构的芳香醛为原料, 利用 Knoevenagel 缩合反应合成了化合物 **17** (Eq. 2). 由于邻近的乙酰氨基间能形成分子间氢键, 实现分子的自组装, 因此 **17** 可形成有机凝胶. 同时, 由于氰基的存在, 在凝胶态时乙酰氨基和氰基间的相互作用使得分子的结构更为扭曲. 在聚集状态下分子内振动受限(RIV), 导致分子发射增强, 因此 **17** 具有 AIE 性质. 有趣的是, **17** 分子中烷基链的长度, 对乙酰氨基的氰基苯乙烯型 AIE 分子的性能影响不大. 因此, 该研究能为荧光型有机凝胶的设计提供新思路。

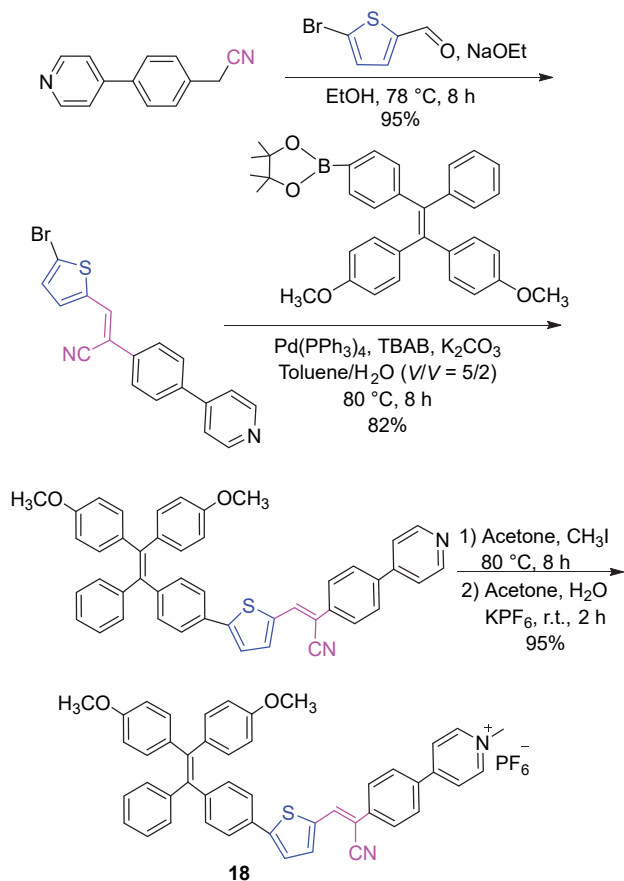
许多研究表明, 芳杂环能够代替苯环桥连在氰基乙烯骨架中构建 AIE 分子^[56], 并得到广泛应用^[57], 特别是应用于生物成像^[58]. 其中, 最常见的杂环是噻吩, 这是因为其具备 π 共轭特性. 同时, 噻吩作为富电子供体, 能和其它电子受体形成强的电子供体-受体(D-A)^[59]. 因此, 含有噻吩的 AIE 分子在生物体内的应用广受关

TPE 型的合成方法类似, 都需要利用 Knoevenagel 缩合反应^[46].

若再利用 Suzuki 偶联反应对芳基进行修饰, 可引入具有一定生物功能的官能团, 使该含有 TPA 单元的三取代烯炔型 AIE 分子在生物体内具有高生物相容性^[47], 为光动力学诊断和治疗提供有利工具^[48]. 例如, 王东课题组^[49]利用 Knoevenagel 缩合反应和 Suzuki 偶联反应, 合



注^[60]. 最近, 丁丹课题组^[61]以溴代噻吩甲醛为原料, 经 Knoevenagel 缩合反应和 Suzuki 偶联反应合成了 AIE 分子 **18** (Scheme 6). **18** 形成的纳米探针在生理 pH 下 ONOO⁻ 存在时, 能显示出近红外长余辉发光, 故可作为双重响应型探针快速、准确区分过敏和炎症, 并实时进行精确的疾病监测.

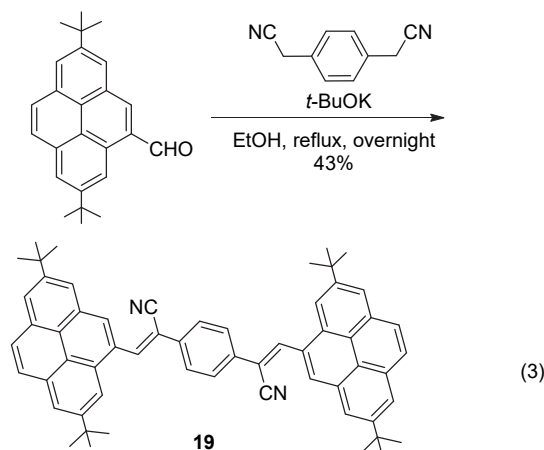


图式 6 化合物 **18** 的合成路线
Scheme 6 Synthetic route of compound **18**

2.2 由稠环芳基和氰基取代的三取代烯烃型 AIE 分子

不仅有大量文献报道了单环芳基和氰基取代的三

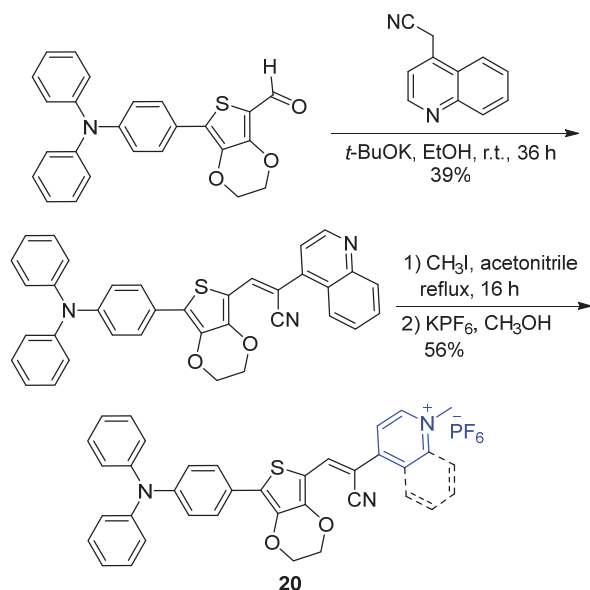
取代烯烃型 AIE 分子, 由稠环芳基构建的分子也很常见^[62], 特别是茈被广泛应用^[63], 因为茈是一种优良的荧光发光团^[64]. 目前, 为了避免茈平面结构引起的 ACQ 现象, 具有一个氰基取代^[65]和两个氰基取代^[66]的三取代烯烃型 AIE 分子都有报道. 唐本忠课题组^[67]以二叔丁基取代的茈甲醛为原料, 合成了可发射蓝色荧光的 AIE 分子 **19** (Eq. 3).



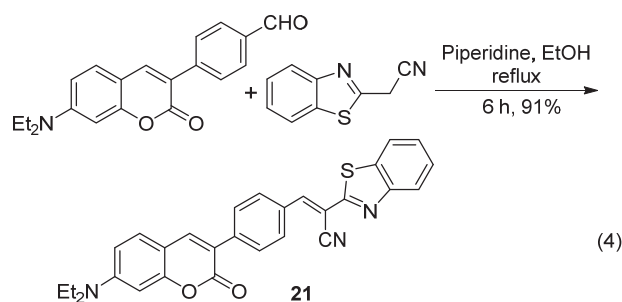
各种含 O^[68]、含 N^[69]的稠杂环在三取代烯烃型 AIE 分子构建也较为常见^[70]. 如果在分子中引入不同的稠杂环, 会得到具有不同应用的分子^[71], 特别是含氮的稠杂环类 AIE 分子在荧光探针^[72]和生物成像^[73]等领域有许多应用. 例如, 吡啶环类三取代烯烃型分子具有 AIE 性能^[74], 且可应用于生物成像及体内线粒体的靶向识别^[75]. 同时, 含噻啉环的三取代烯烃型分子在体内线粒体的靶向识别中也有优良定位效果. 最近, 何汉平课题组^[76]通过合成化合物 **20** (Scheme 7), 并研究其应用性能证明了这一点.

苯并噻类杂环(如苯并咪唑、苯并噻唑^[77])常用于荧光探针^[78], 包括 AIE 类荧光探针^[79-80], 特别是苯并噻唑在分子中可作为电子受体(A)引入三取代烯烃型 AIE 分子中^[81]. 林伟英课题组^[82]合成了一种对联氨具有低检测限的 D- π -A 型 AIE 分子 **21** (Eq. 4). 其中, 二乙胺基香豆素部分作为 D, 苯并噻唑作为 A, 而苯环作为 π 桥梁在分子中存在香豆素到苯并噻唑的分子内电荷转移 (ICT) 过程.

三元杂环吩噻嗪具有强供电子能力和蝴蝶状结构, 能阻止分子间 π - π 的堆积, 也是典型的 AIE 构建模块^[83]. 近来李凌课题组^[84]通过 Knoevenagel 缩合反应和 Suzuki 偶联反应合成了 **22** (Scheme 8). **22** 是 D-A- π -A 型分子, ICT 效应强. 聚集时甲氧基三苯胺基团作为转子, 能有效抑制分子间堆积, 促进系间窜越, 有利于产生活性氧. 因此, **22** 在荧光成像引导的光动力学疗法中具有应用潜力. 目前, 基于吩噻嗪构建的三取代 AIE 分子已广泛应



图式 7 化合物 20 的合成路线
Scheme 7 Synthetic route of compound 20



(4)

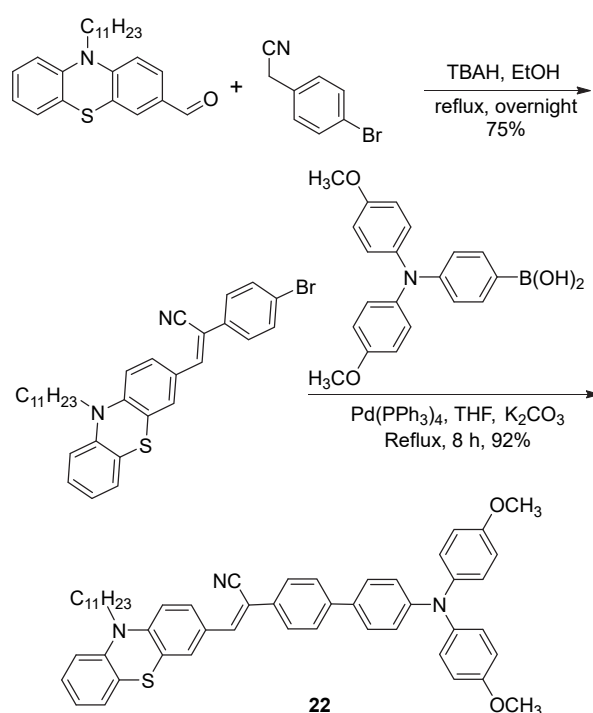
用于多功能治疗药物^[85]、细胞成像^[86]和机械变色材料^[87-88]等领域。

3 双键相连杂原子的三取代烯烃型 AIE 分子

3.1 双键相连氮族的三取代烯烃型 AIE 分子

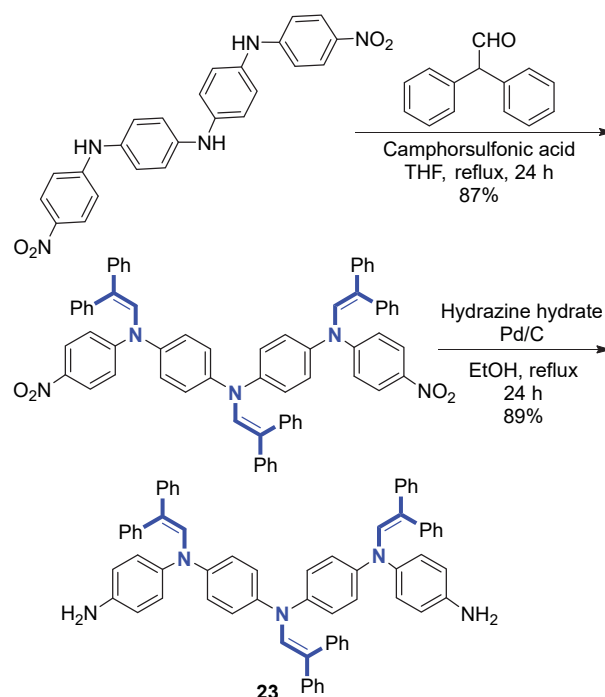
近年来, 尽管非杂原子取代的三取代烯烃型 AIE 分子的构建非常活跃^[89-90], 但杂原子在 AIE 分子的构建中也开始慢慢扮演着重要的角色^[91-92], 而且基于杂原子取代的三取代烯烃型 AIE 分子, 在探针^[93]和光疗剂^[94]等领域已有成功应用。其中, 研究较多的是将氰基乙烯中的 CN 变成 N 原子, 构建出新的 AIE 分子^[95]。

N 原子通常和苯乙烯骨架一起结合构建 AIE 分子, 无论是单苯基乙烯骨架^[96]还是双苯基乙烯骨架^[97], 都能构建出 N 原子三取代型分子。将 N 原子引入烯烃骨架的关键步骤, 是羰基化合物和胺的 Stork 烯胺化反应^[98]。杨继萍课题组^[99]通过 Stork 烯胺化反应和还原反应合成了 AIE 型探针 **23** (Scheme 9)。由于分子中的氨基可以和 Fe^{3+} 配位使荧光猝灭, **23** 被用于检测 Fe^{3+} 。此外, **23** 还能作为 Turn-on 型荧光探针检测大肠杆菌和金



图式 8 化合物 22 的合成路线
Scheme 8 Synthetic route of compound 22

黄色葡萄球菌。



图式 9 化合物 23 的合成路线
Scheme 9 Synthetic route of compound 23

含 N 杂环中具有上述的氨基三取代烯烃结构时, 也能成功构建 AIE 分子^[100]。在这方面, 国内外均有课题组进行相关研究, 如化合物 **24**^[101]和 **25**^[102](图 3)。近来,

德国 Müller 课题组^[103]以酰氯和苯并噻唑盐为原料, 合成了一系列含稠杂环的类似 AIE 分子 **26** (Eq. 5). 在 **26** 中, 决定 AIE 效应的是苯并噻唑烯炔部分, 但当烷基 R^1 发生改变时, 可具有不同颜色的荧光发射, 故 **26** 被应用于光电子器件领域.

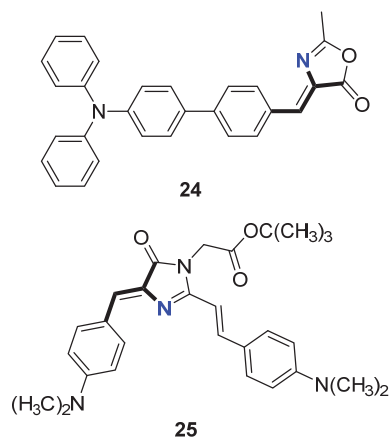
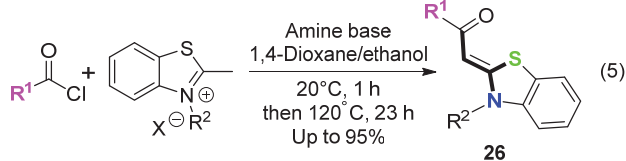


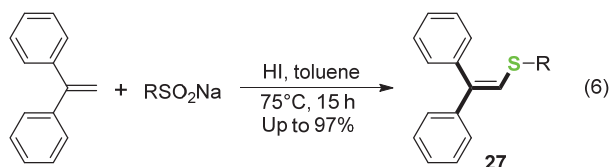
图 3 化合物 **24** 和 **25** 的结构

Figure 3 Structure of compounds **24** and **25**



3.2 双键相连氧族的三取代烯炔型 AIE 分子

实际上, 尽管 N、S 原子同时与烯炔碳相连的三取代烯炔型 AIE 分子已有报道^[104], 但仅 S 原子与烯炔碳相连的三取代烯炔型 AIE 分子却鲜有报道. 本课题组在研究含硫试剂的反应时^[105], 在机理研究中意外发现, 以 1,1-二苯基乙烯和芳基亚磺酸盐为原料, 在温和条件下可成功合成一系列三取代烯炔型 AIE 分子 **27** (Eq. 6), 其能应用于水相系统中苦味酸的检测^[106]. 目前, 这类含 S 的三取代烯炔型 AIE 分子的合成已引起关注^[107].



值得注意的是, 虽然 O、S 和 Se 是同族元素, 但是含 O 和 Se 原子的三取代烯炔型 AIE 分子的研究更少被关注. 唐本忠课题组^[108]在研究带有 TPE 单元的含 S 高分子的 AIE 性能与细胞成像应用时, 也报道了含 Se 的具有 AIE 性能分子 **28** (图 4). 正如其所言, 这是将 TPE

作为传统 AIE 发光团引入分子中的结果, 因为不含有 TPE 单元的 **29** (图 4) 则是 ACQ 分子. 类似地, 刘玮课题组^[109]在研究含 O 原子的三取代烯炔型 AIE 分子 **30** (图 4) 时也提到了这一点. 因此, 不以引入 TPE 等 AIE 发光团而设计、构建氧族原子相连的三取代烯炔型 AIE 分子的研究, 仍然有许多亟待探索的地方.

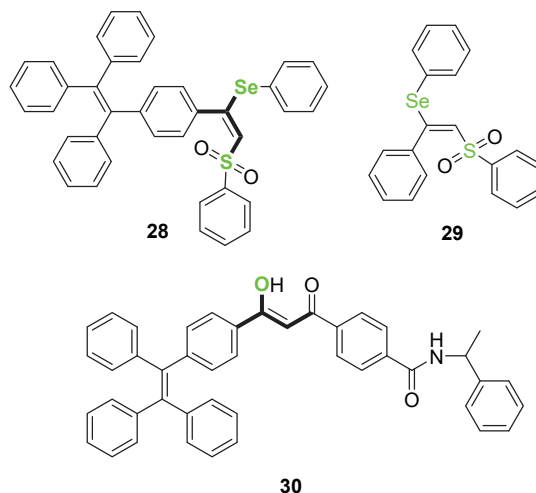


图 4 化合物 **28**~**30** 的结构

Figure 4 Structure of compounds **28**~**30**

4 结束语

总之, 随着 AIE 概念的发展和完善, 其受到越来越广泛的关注^[110], 三取代烯炔型 AIE 分子在生物治疗^[111-112]、毒害离子检测^[113]和染料^[114]等领域也具有重要的应用价值. 目前, 三取代烯炔型 AIE 分子的构建大多是基于多芳基的三烷基乙烯骨架和氰基乙烯骨架构建的^[115-116], 涉及杂原子与烯炔碳相连的三取代烯炔型 AIE 分子报道相对较少.

因此, 如何基于 AIE 分子的分子内运动受限(RIM)作用机制^[117](包括 RIR^[118]和 RIV^[119]), 在较为温和的绿色合成条件下, 包括结合简洁的光、电合成方法, 开发出其它新的三取代烯炔型 AIE 分子骨架, 特别是将 N、S、O 等具有独特性质的杂原子与三取代烯炔骨架巧妙结合, 或许能构建出具备特殊性质和应用的三取代烯炔型 AIE 分子, 这些仍是未来一个重要的研究方向. 我们相信, 如果有越来越多的学者参与到这方面的探索, 具有独特功能的新型 AIE 分子骨架研究一定会实现新的突破.

References

- [1] 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.
- [2] Mei, J.; Leung, N. L. C.; Kwok, R. T. K.; Lam, J. W. Y.; Tang, B. Z. *Chem. Rev.* **2015**, 115, 11718.
- [3] Hu, F.; Xu, S. D.; Liu, B. *Adv. Mater.* **2018**, 30, 1801350.

- [4] Cai, X. L.; Liu, B. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, *59*, 9868.
- [5] Hu, R.; Leung, N. L. C.; Tang, B. Z. *Chem. Soc. Rev.* **2014**, *43*, 4494.
- [6] Yang, K.; Luo, S.-H.; Chen, S.-H.; Cao, X.-Y.; Zhou, Y.-J.; Lin, Y.-L.; Huo, Y.-P.; Wang, Z.-Y. *Org. Biomol. Chem.* **2021**, *19*, 8133.
- [7] Zhao, Z. J.; He, B. R.; Tang, B. Z. *Chem. Sci.* **2015**, *6*, 5347.
- [8] Liu, Y. Y.; Zhang, X.; Li, K.; Peng, Q. C.; Qin, Y. J.; Hou, H. W.; Zang, S. Q.; Tang, B. Z. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2021**, *60*, 22417.
- [9] Zhao, J.; Chi, Z. H.; Yang, Z. Y.; Mao, Z.; Zhang, Y.; Ubba, E.; Chi, Z. G. *Mater. Chem. Front.* **2018**, *2*, 1595.
- [10] Feng, H. T.; Yuan, Y. X.; Xiong, J. B.; Zheng, Y. S.; Tang, B. Z. *Chem. Soc. Rev.* **2018**, *47*, 7452.
- [11] Sun, Y. Y.; Neary, W. J.; Burke, Z. P.; Qian, H.; Zhu, L. Y.; Moore, J. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 1125.
- [12] Wang, Y. W.; Li, Y. M.; Zhang, Z. J.; Wang, L.; Wang, D.; Tang, B. Z. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2103748.
- [13] Zeng, J.; Wang, X. H.; Song, X. Y.; Liu, Y. W.; Liao, B. Y.; Bai, J.; Redshaw, C.; Chen, Q.; Feng, X. *Dyes Pigm.* **2022**, *200*, 110123.
- [14] Yu, W. T.; Zhang, H.; Yin, P. A.; Zhou, F.; Wang, Z. M.; Wu, W. Q.; Peng, Q.; Jiang, H. F.; Tang, B. Z. *iScience* **2020**, *23*, 101587.
- [15] Mudi, P. K.; Das, A.; Mahata, N.; Biswas, B. *J. Mol. Liq.* **2021**, *340*, 117193.
- [16] Han, J. H.; Gao, W. Y.; Feng, L. H.; Wang, Y.; Shuang, S. M. *J. Photochem. Photobiol., A* **2021**, *421*, 113515.
- [17] Zhang, J. B.; Xu, B.; Chen, J. L.; Ma, S. Q.; Dong, Y. J.; Wang, L. J.; Li, B.; Ye, L.; Tian, W. J. *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 739.
- [18] Jia, Y. J.; Guo, S. S.; Han, Q. Z.; Zhu, J. L.; Zhang, X. L.; Na, N.; Ouyang, J. J. *Mater. Chem. B* **2021**, *9*, 5128.
- [19] Tang, Y. J.; Zhang, D.; Zhang, Y. X.; Liu, Y. L.; Cai, L. R.; Plaster, E.; Zheng, J. J. *Mater. Chem. B* **2022**, *10*, 2280.
- [20] Borjihan, Q.; Wu, H. X.; Dong, A.; Gao, H.; Yang, Y. W. *Adv. Healthcare Mater.* **2021**, *10*, 2100877.
- [21] Kong, T. T.; Zhao, Z.; Li, Y.; Wu, F.; Jin, T.; Tang, B. Z. *J. Mater. Chem. B* **2018**, *6*, 5986.
- [22] Adil, L. R.; Iyer, P. K. *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 7633.
- [23] Yang, Z. Y.; Chi, Z. G.; Yu, T.; Zhang, X. Q.; Chen, M. N.; Xu, B. J.; Liu, S. W.; Zhang, Y.; Xu, J. R. *J. Mater. Chem.* **2009**, *19*, 5541.
- [24] Dong, X. Q.; Wang, S. J.; Gui, C.; Shi, H. P.; Cheng, F. Q.; Tang, B. Z. *Tetrahedron* **2018**, *74*, 497.
- [25] Shi, H. P.; Wang, S. J.; Qin, L. Y.; Gui, C.; Zhang, X. L.; Fang, L.; Chen, S. M.; Tang, B. Z. *Dyes Pigm.* **2018**, *149*, 323.
- [26] Zhou, T.; Zhang, K. Z.; Cao, Q. P.; Xu, H.; Ban, X. X.; Zhu, P.; Li, Q. L.; Shi, L. X.; Ge, F. J.; Jiang, W. J. *Mater. Chem. C* **2022**, *10*, 2109.
- [27] Duan, Y. C.; Gao, Y.; Pan, Q. Q.; Zhao, Z. W.; Wu, Y.; Zhao, L.; Geng, Y.; Su, Z. M. *Dyes Pigm.* **2021**, *194*, 109547.
- [28] Wu, M. Y.; Leung, J. K.; Kam, C.; Chou, T. Y.; Wang, D.; Feng, S.; Chen, S. J. *Mater. Chem. Front.* **2022**, *5*, 3043.
- [29] Carayon, C.; Ghodbane, A.; Leygue, N.; Wang, J.; Safon-Merceron, N.; Brown, R.; Fery-Forgues, S. *ChemPhotoChem* **2019**, *3*, 545.
- [30] Yin, G. H.; Li, Y.; Li, S.; Xu, B.; Yang, Q. S.; Zhang, Y. C.; Zhao, J. Q.; Cao, X. H. *Dyes Pigm.* **2022**, *198*, 110013.
- [31] Zhang, Z. J.; Xu, W. H.; Xiao, P. H.; Kang, M. M.; Yan, D. Y.; Wen, H. F.; Song, N.; Wang, D.; Tang, B. Z. *ACS Nano* **2021**, *15*, 10689.
- [32] Zhang, Y. P.; Li, D. D.; Li, Y.; Yu, J. H. *Chem. Sci.* **2014**, *5*, 2710.
- [33] Xie, H. T.; Wu, Y. L.; Zeng, F.; Chen, J. J.; Wu, S. Z. *Chem. Commun.* **2017**, *53*, 9813.
- [34] Qiu, J. B.; Chen, Y. X.; Jiang, S. J.; Guo, H. Y.; Yang, F. F. *Analyst* **2018**, *143*, 4298.
- [35] Kang, M. M.; Zhang, Z. J.; Xu, W. H.; Wen, H. F.; Zhu, W.; Wu, Q.; Wu, H. Z.; Gong, J. Y.; Wang, Z. J.; Wang, D.; Tang, B. Z. *Adv. Sci.* **2021**, *8*, 2100524.
- [36] Lu, Q. Y.; Li, X. F.; Li, J.; Yang, Z. Y.; Xu, B. J.; Chi, Z. G.; Xu, J. R.; Zhang, Y. J. *Mater. Chem. C* **2015**, *3*, 1225.
- [37] Yin, Y. Y.; Zhang, S. S.; He, X.; Xu, X.; Zhang, G. B.; Yang, L. M.; Kong, L.; Yang, J. X. *Chem. Pap.* **2021**, *75*, 6297.
- [38] Chen, S.-H.; Xu, J.-M.; Li, Y.-M.; Peng, B.-R.; Luo, L.-Y.; Feng, H.-Y.; Chen, Z.-H.; Wang, Z.-Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2022**, *42*, 1651 (in Chinese).
- (陈思鸿, 许佳敏, 李月媚, 彭宝茹, 罗凌玉, 冯慧烨, 陈兆华, 汪朝阳, 有机化学, **2022**, *42*, 1651.)
- [39] Yang, X. Z.; Wang, Q.; Hu, P. Y.; Xu, C.; Guo, W. J.; Wang, Z.; Mao, Z.; Yang, Z.; Liu, C.; Shi, G.; Chen, L.; Xu, B. J.; Chi, Z. G. *Mater. Chem. Front.* **2020**, *4*, 941.
- [40] Wang, X. H.; Wang, L. R.; Mao, X. Y.; Wang, Q. S.; Mu, Z. F.; An, L.; Zhang, W.; Feng, X.; Redshaw, C.; Cao, C. Y.; Qin, A. J.; Tang, B. Z. *J. Mater. Chem. C* **2021**, *9*, 12828.
- [41] Zhan, Y.; Zhao, Q.; Yang, W. J. *Tetrahedron Lett.* **2021**, *73*, 153136.
- [42] Gao, Y. T.; Wang, X. X.; He, X. W.; He, Z. Y.; Yang, X.; Tian, S. D.; Meng, F. L.; Ding, D.; Luo, L.; Tang, B. Z. *Adv. Funct. Mater.* **2019**, *29*, 1902673.
- [43] Arulkumar, M.; Yang, K.; Wang, N.; Penislusshian, S.; Palvannan, T.; Ramalingam, K.; Chen, F. M.; Luo, S.-H.; Zhou, Y.-J.; Wang, Z.-Y. *New J. Chem.* **2021**, *46*, 675.
- [44] Lu, Q.; Wu, C. J.; Liu, Z. Q.; Niu, G. L.; Yu, X. Q. *Front. Chem.* **2020**, *8*, 617463.
- [45] Zhang, Y. J.; Zhuang, G. L.; Ouyang, M.; Hu, B.; Song, Q. B.; Sun, J. W.; Zhang, C.; Gu, C.; Xu, Y. X.; Ma, Y. G. *Dyes Pigm.* **2013**, *98*, 486.
- [46] Yang, J. L.; Dai, J.; Wang, Q.; Cheng, Y.; Guo, J. J.; Zhao, Z. J.; Hong, Y. N.; Lou, X. D.; Xia, F. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 20405.
- [47] Yu, C. Y. Y.; Xu, H.; Ji, S. L.; Kwok, R. T. K.; Lam, J. W. Y.; Li, X. L.; Krishnan, S.; Ding, D.; Tang, B. Z. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1606167.
- [48] Wang, X.; Liu, L. Q.; Wang, L. J.; Guo, L. Q.; Li, Y. B.; Bai, B.; Fu, F.; Lu, H. G.; Zhao, X. W. *Adv. Healthcare Mater.* **2021**, *10*, 2100360.
- [49] Xiao, P. H.; Ma, K.; Kang, M. M.; Huang, L. Y.; Wu, Q.; Song, N.; Ge, J. Y.; Li, D.; Dong, J. X.; Wang, L.; Wang, D.; Tang, B. Z. *Chem. Sci.* **2021**, *12*, 13949.
- [50] Zhang, X. Y.; Qin, W. W.; Cheng, B. F.; Guo, H. Y.; Yang, F. F. *J. Mol. Liq.* **2020**, *298*, 112074.
- [51] Chen, M. H.; Ren, Y.; Liu, H.; Jiang, Q.; Zhang, J.; Zhu, M. G. *J. Fluoresc.* **2021**, *31*, 475.
- [52] Mishra, R. K.; Vijayakumar, S.; Mal, A.; Karunakaran, V.; Jannardhanan, J. C.; Maiti, K. K.; Praveen, V. K.; Ajayaghosh, A. *Chem Commun.* **2019**, *55*, 6046.
- [53] Zhao, Q.; Zhang, S. Y.; Wu, F. C.; Li, D. Y.; Zhang, X. J.; Chen, W.; Xing, B. S. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 14760.
- [54] Xiao, Y.; Wang, Z.-Y.; Luo, S.-H.; Lin, J.-Y.; Cao, X.-Y.; Fang, Y.-G. *Polymer* **2021**, *231*, 124126.
- [55] Dominguez, R.; Navarro, A.; Garcia-Martinez, J. C. *Dyes Pigm.* **2021**, *192*, 109427.
- [56] Zhang, F.; Li, Z.; Liu, Y. M.; Yang, B. S.; Qiao, H.; Chai, J.; Wen, G. M.; Liu, B. *J. Mater. Chem. B* **2020**, *8*, 9533.
- [57] Chen, C.; Ni, X.; Jia, S. R.; Liang, Y.; Wu, X. L.; Kong, D. L.; Ding, D. *Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1904914.
- [58] Niu, G. L.; Zheng, X. L.; Zhao, Z.; Zhang, H. K.; Wang, J. G.; He, X. W.; Chen, Y. C.; Shi, X. J.; Ma, C.; Kwok, R. T. K.; Lam, J. W. Y.; Sung, H. H. Y.; Williams, I. D.; Wong, K. S.; Wang, P. F.; Tang, B. Z. *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 15111.
- [59] Kumar, G. R.; Sarkar, S. K.; Thilagar, P. *Chem.-Eur. J.* **2016**, *22*, 17215.
- [60] Zalmi, G. A.; Nadimetla, D. N.; Kotharkar, P.; Puyad, A. L.; Kowshik, M.; Bhosale, S. V. *ACS Omega* **2021**, *6*, 16704.
- [61] Chen, C.; Gao, H. Q.; Ou, H. L.; Kwok, R. T. K.; Tang, Y. H.; Zheng, D. H.; Ding, D. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 3429.
- [62] Chen, S. J.; Zhang, W. X.; Liu, W.; Ge, Z. H.; Wang, K. P.; Gan, L. H.; Hu, Z. Q. *CrystEngComm* **2019**, *21*, 2809.
- [63] Islam, M. M.; Hu, Z.; Wang, Q. S.; Redshaw, C.; Feng, X. *Mater. Chem. Front.* **2019**, *3*, 762.
- [64] Kokado, K.; Sada, K. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 8632.
- [65] Bai, C. B.; Zhang, J.; Yue, S. Y.; Qin, Y. X.; Chen, M. Y.; Zhang, L.; Miao, H.; Wang, C.; Qiao, R.; Qu, C. Q. *J. Lumin.* **2021**, *237*, 118182.
- [66] Wang, T. S.; Shen, L.; Wang, H. X.; Zhang, N. *J. Mol. Struct.* **2021**,

- 1231, 129671.
- [67] Feng, X.; Zhang, J.; Hu, Z.; Wang, Q. S.; Islam, M. M.; Ni, J. S.; Elsegood, M. R. J.; Lam, J. W. Y.; Zhou, E. J.; Tang, B. Z. *J. Mater. Chem. C* **2019**, 7, 6932.
- [68] Yang, X. R.; Jin, L. Y.; Chen, Y. H.; Zhong, X. L.; Jiang, Y. L.; Dai, Z. H. *J. Photochem. Photobiol., A* **2021**, 419, 113464.
- [69] Ma, Y. W.; Li, Y.; Chen, L. G.; Xiong, Y.; Yin, G. H. *Dyes Pigm.* **2016**, 126, 194.
- [70] Tarai, A.; Huang, M. N.; Das, P.; Pan, W. H.; Zhang, J. G.; Gu, Z. Y.; Yan, W.; Qu, J. L.; Yang, Z. G. *Molecules* **2020**, 25, 585.
- [71] Huang, Z. F.; Chen, Y. L.; Zhou, C. Y.; Li, Y. H.; Li, M.; Liu, X. B.; Mao, L. C.; Yuan, J. Y.; Tao, L.; Wei, Y. *Chin. J. Polym. Sci.* **2021**, 39, 1431.
- [72] Ma, C. P.; Li, Z. Y.; Zhang, C. L.; Xie, G. Y.; Wu, Y. C.; Zhang, Y. F.; Mo, J. P.; Liu, X.; Wang, K.; Xie, D.; Li, Y. *Front. Chem.* **2021**, 9, 727631.
- [73] Nie, H. L.; Liang, Y. H.; Han, C.; Zhang, R. B.; Zhang, X. L.; Yan, H. Y. *Dyes Pigm.* **2019**, 168, 42.
- [74] Kachwal, V.; Laskar, I. R. *Top. Curr. Chem.* **2021**, 379, 28.
- [75] Li, Li; Yuan, G.; Qi, Q. J.; Lv, C.; Liang, J. C.; Li, H. J.; Cao, L.; Zhang, X. H.; Wang, S. F.; Cheng, Y.; He, H. P. *J. Mater. Chem. B* **2022**, DOI: 10.1039/D1TB02598H.
- [76] Yuan, G.; Lv, C.; Liang, J. C.; Zhong, X. X.; Li, Y.; He, J. C.; Zhao, A. J.; Li, L.; Shao, Y. H.; Zhang, X. H.; Wang, S. F.; Cheng, Y.; He, H. P. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, 31, 2104026.
- [77] Chen, S.-H.; Luo, S.-H.; Xing, L.-J.; Jiang, K.; Huo, Y.-P.; Chen, Q.; Wang, Z.-Y. *Chem.-Eur. J.* **2022**, 28, e202103478.
- [78] Wang, N.; Arulkumar, M.; Chen, X.-Y.; Wang, B.-W.; Chen, S.-H.; Yao, C.; Wang, Z.-Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, 39, 2771 (in Chinese).
(王能, Arulkumar M., 陈孝云, 王柏文, 陈思鸿, 姚辰, 汪朝阳, 有机化学, **2019**, 39, 2771.)
- [79] Yang, K.; Chen, Z.-X.; Zhou, Y.-J.; Chen, Q.; Yu, S.-W.; Luo, S.-H.; Wang, Z.-Y. *Org. Chem. Front.* **2022**, 9, 1127.
- [80] Pan, Y. X.; Ban, L. F.; Li, J. J.; Liu, M.; Tang, L. J.; Yan, X. M. *Dyes Pigm.* **2022**, 203, 110305.
- [81] Ma, C. P.; Xie, G. Y.; Zhang, X. Q.; Yang, L. T.; Li, Y.; Liu, H. L.; Wang, K.; Wei, Y. *Dyes Pigm.* **2017**, 139, 672.
- [82] Kong, X. Q.; Li, M.; Zhang, Y. Y.; Yin, Y. G.; Lin, W. Y. *Sens. Actuators, B* **2021**, 329, 129232.
- [83] Gong, J. Y.; Han, J. L.; Liu, Q.; Ren, X. J.; Wei, P. F.; Yang, L.; Zhang, Y.; Liu, J.; Dong, Y. Q.; Wang, Y. G.; Song, X. Z.; Tang, B. Z. *J. Mater. Chem. C* **2019**, 7, 4185.
- [84] Tian, J. W.; Teng, M. Z.; Song, M.; Li, Z. J.; Zhang, X. Y.; Xu, Y. Q. *Dyes Pigm.* **2021**, 194, 109651.
- [85] Jiang, R. M.; Liu, H.; Liu, M. Y.; Tian, J. W.; Huang, Q.; Huang, H. Y.; Wen, Y. Q.; Cao, Q. Y.; Zhang, X. Y.; Wei, Y. *Mater. Sci. Eng. C Mater.* **2017**, 81, 416.
- [86] Wei, D.; Xue, Y.; Huang, H. Y.; Liu, M. Y.; Zeng, G. J.; Wan, Q.; Liu, L. J.; Yu, J.; Zhang, X. Y.; Wei, Y. *Mater. Sci. Eng., C* **2017**, 81, 120.
- [87] Huang, X. B.; Qian, L. B.; Zhou, Y. B.; Liu, M. C.; Cheng, Y. X.; Wu, H. Y. *J. Mater. Chem. C* **2018**, 6, 5075.
- [88] Sarkar, B.; Prasad, E.; Gardas, R. L. *Dyes Pigm.* **2022**, DOI: 10.1016/j.dyepig.2022.110246.
- [89] Li, S. F.; Zhuang, W. H.; Chen, J. R.; Li, L. L.; Li, G. C.; Li, J. L.; Liao, Y. B.; Chen, M.; Wang, Y. B. *Sens. Actuators, B* **2021**, 346, 130458.
- [90] Qiao, W. G.; Ma, T.; Wang, S. S.; Li, L. J.; Liu, M.; Jiang, H.; Wu, Y. Z.; Zhu, J. T.; Li, Z. A. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, 31, 2105452.
- [91] Li, Y. X.; Zha, M. L.; Kang, T. Y.; Li, C.; Wu, X.; Wang, S. X.; Lu, S. B.; Lee, Y. S.; Wu, Y. R.; Ni, J. S.; Li, K. *Small* **2022**, 18, 2105362.
- [92] Guo, X.; Tang, B.; Wu, Q. H.; Bu, W. B.; Zhang, F.; Yu, C. J.; Jiao, L. J.; Hao, E. H. *J. Mater. Chem. B* **2022**, 10, 5612.
- [93] Dai, J. A.; Zhao, Y.; Hou, Y. D.; Zhong, G. Y.; Gao, R.; Wu, J. C.; Shen, B. X.; Zhang, X. *Dyes Pigm.* **2021**, 192, 109444.
- [94] Liu, L. Q.; Wang, X.; Wang, L. J.; Guo, L. Q.; Li, Y. B.; Bai, B.; Fu, F.; Lu, H. G.; Zhao, X. W. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 19668.
- [95] Korzec, M.; Kotowicz, S.; Gawrecki, R.; Malarz, K.; Mrozek-Wilczkiewicz, A.; Siwy, M.; Schab-Balcerzak, E.; Grzelak, J.; Mackowski, S. *Dyes Pigm.* **2021**, 193, 109508.
- [96] Elsner, A. L.; Biesen, L.; Müller, T. J. J. *ARKIVOC* **2021**, 53.
- [97] Lu, H.; Wang, K.; Liu, B. B.; Wang, M.; Huang, M. M.; Zhang, Y.; Yang, J. P. *Mater. Chem. Front.* **2019**, 3, 331.
- [98] Liu, B. B.; Wang, K.; Lu, H.; Huang, M. M.; Yang, J. P. *New J. Chem.* **2019**, 43, 11816.
- [99] Liu, B. B.; He, W.; Lu, H.; Wang, K.; Huang, M. M.; Kwok, R. T. K.; Lam, J. W. Y.; Gao, L. C.; Yang, J. P.; Tang, B. Z. *Sci. China. Chem.* **2019**, 62, 732.
- [100] Zheng, X. W.; Dai, J. A.; Shen, B. X.; Zhang, X. *Tetrahedron* **2021**, 90, 132218.
- [101] de Thieulloy, L.; Le Bras, L.; Zumer, B.; Garcia, J. S.; Lemarchand, C.; Pineau, N.; Adamo, C.; Perrier, A. *ChemPhysChem* **2021**, 22, 1802.
- [102] Liu, Y.; Wolstenholme, C. H.; Carter, G. C.; Liu, H. B.; Hu, H.; Grainger, L. S.; Miao, K.; Fares, M.; Hoelzel, C. A.; Yennawar, H. P.; Ning, G.; Du, M. Y.; Bai, L.; Li, X. S.; Zhang, X. *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, 140, 7381.
- [103] Biesen, L.; Nirmalanathan-Budau, N.; Hoffmann, K.; Resch-Genger, U.; Müller, T. J. J. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 10037.
- [104] Biesen, L.; May, L.; Nirmalanathan-Budau, N.; Hoffmann, K.; Resch-Genger, U.; Müller, T. J. J. *Chem.-Eur. J.* **2021**, 27, 13426.
- [105] Cao, L.; Luo, S.-H.; Jiang, K.; Hao, Z.-F.; Wang, B.-W.; Pang, C.-M.; Wang, Z.-Y. *Org. Lett.* **2018**, 20, 4754.
- [106] Wang, B.-W.; Jiang, K.; Li, J.-X.; Luo, S.-H.; Wang, Z.-Y.; Jiang, H.-F. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, 59, 2338.
- [107] Zhang, J. W.; Wang, E. F.; Zhou, Y.; Zhang, L.; Chen, M.; Lin, X. R. *Org. Chem. Front.* **2020**, 7, 1490.
- [108] Gao, Q. Q.; Xiong, L. H.; Han, T.; Qiu, Z. J.; He, X. W.; Sung, H. H. Y.; Kwok, R. T. K.; Williams, I. D.; Lam, J. W. Y.; Tang, B. Z. *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 14712.
- [109] Yang, H.; Zhang, W.; Lu, X. H.; Liu, W.; Wang, Y.; Li, H. K.; Yang, Y. G. *Dyes Pigm.* **2021**, 192, 109396.
- [110] Zhang, Z.; Xu, W.; Kang, M.; Wen, H.; Guo, H.; Zhang, P.; Xi, L.; Li, K.; Wang, L.; Wang, D.; Tang, B. Z. *Adv. Mater.* **2020**, 32, 2003210.
- [111] Li, D.; Li, Y. M.; Wu, Q.; Xiao, P. H.; Wang, L.; Wang, D.; Tang, B. Z. *Small* **2021**, 17, 2102044.
- [112] Zheng, Z.; Zhang, H. Q.; Cao, H.; Gong, J. Y.; He, M. B.; Gou, X. X.; Yang, T. Y.; Wei, P. F.; Qian, J.; Xi, W.; Tang, B. Z. *ACS Nano* **2022**, 16, 6444.
- [113] Wan, H. B.; Xu, Q. F.; Gu, P. Y.; Li, H.; Chen, D. Y.; Li, N. J.; He, J. H.; Lu, J. M. *J. Hazard Mater.* **2021**, 403, 123656.
- [114] Vonhausen, Y.; Lohr, A.; Stolte, M.; Wurthner, F. *Chem. Sci.* **2021**, 12, 12302.
- [115] Prabhu, S.; Palanisami, N. *Dyes Pigm.* **2022**, 201, 110193.
- [116] Liu, Z. X.; Wang, Q.; Qiu, W. S.; Lyu, Y. T.; Zhu, Z. R.; Zhao, X. L.; Zhu, W.-H. *Chem. Sci.* **2022**, 13, 3599.
- [117] Tu, Y. J.; Zhao, Z.; Lam, J. W. Y.; Tang, B. Z. *Natl. Sci. Rev.* **2021**, 8, nwaa260.
- [118] Xu, S. D.; Duan, Y. K.; Liu, B. *Adv. Mater.* **2020**, 32, 1903530.
- [119] Zhao, Z.; Zheng, X. Y.; Du, L. L.; Xiong, Y.; He, W.; Gao, X. X.; Li, C. L.; Liu, Y. J.; Xu, B.; Zhang, J.; Song, F. Y.; Yu, Y.; Zhao, X. Q.; Cai, Y. J.; He, X. W.; Kwok, R. T. K.; Lam, J. W. Y.; Huang, X. H.; Phillips, D. L.; Wang, H.; Tang, B. Z. *Nat. Commun.* **2019**, 10, 2952.

(Li, L.)