

一种三苯胺基氟硼化合物光学性能 及潜指纹成像研究*

杜玉松, 陈春琳, 董官茺, 田佳壮, 高树林, 杨艳华**

(昆明学院 化学化工学院 云南省金属有机分子材料与器件重点实验室, 云南 昆明 650214)

[摘要] 二氟化硼化合物不仅具有优异的光物理性质, 而且在光电功能材料领域具有广泛应用. 为进一步探究二氟化硼化合物的应用, 以吩噻嗪为原料, 经亲核取代反应、还原反应、亲核缩合反应和配位反应, 合成一种含有三苯胺和吩噻嗪基团的二氟化硼化合物. 在不同极性有机溶剂和四氢呋喃/水混合溶剂中的测试结果表明, 该化合物具有分子内电荷跃迁特性和聚集诱导发光活性, 并通过量子化学计算对实验结果进行解释. 此外, 该化合物可作为显影剂, 使玻璃板上的潜指纹成像. 通过肉眼可清晰地识别出潜指纹图像的部分一级、二级和三级指纹特征细节.

[关键词] 吩噻嗪; 二氟化硼化合物; 聚集诱导发光; 潜指纹成像

[中图分类号] O626.32, O622.6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5639 (2024) 06-0056-06

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2024.06.008

具有 N⁺O⁻ 配位的二氟化硼化合物不仅具有较大的消光系数和较高的荧光量子产率, 而且在细胞成像、机械传感器和信息存储领域具有潜在应用^[1]. 为进一步探索二氟化硼化合物的应用领域, 研究人员投入了大量的精力并取得了一些重要的进展. 例如, 武汉大学龚少龙课题组报道了一种含有吩噻嗪基团的 N⁺O⁻ 配位二氟化硼化合物, 该化合物以吩噻嗪作为电子供体, 二氟化硼部分作为电子受体. 研究发现, 该化合物不仅可用于构建具有高效红色/深红色热激活延迟荧光的有机发光二极管^[2], 而且可有效提高掺杂薄膜中的光致发光荧光量子产率和反向系间窜跃速率. 吉林大学叶开其课题组报道了一种以咔唑作为电子供体, 二氟化硼部分作为电子受体的 N⁺O⁻ 配位二氟化硼化合物, 其干凝膜的薄膜发射黄色荧光, 可用于检测三氟乙酸蒸气, 检测的衰减时间和检测极限分别为 0.8 s 和 2.60×10^{-7} ^[3]. 课题组在前期报道了两种以三苯胺为电子供体, 二氟化硼部分作为电子受体的 N⁺O⁻ 配位二氟化硼化合物, 发现其不仅具有典型的分子内电荷跃迁特性和聚集诱导发光 (AIE) 活性, 而且固体粉末还具有可逆的机械力致荧光变色性能, 并探究其在信息存储领域的应用^[4,5].

基于以上研究, 课题组拟以三苯胺和吩噻嗪基团为电子供体, 二氟化硼部分作为电子受体, 设计并合成一种 N⁺O⁻ 配位的二氟化硼化合物. 光学测试结果表明, 该化合物具有优异的分子内电荷跃迁性能和 AIE 活性. 量子化学计算结果表明, 分离的前线轨道电荷分布和扭曲的非共面空间构型, 是产生其光学性能的原因. 基于该化合物在四氢呋喃/水混合溶剂中表现出的聚集诱导行为, 制备出的显影剂可使玻璃板上的潜指纹成像, 并能清晰地识别出部分指纹的一级、二级和三级特征细节.

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

5-溴水杨醛 (98%) 和 4-(二苯基氨基)苯基硼酸 (98%) 购自上海麦克林生化科技股份有限公司

* [收稿日期] 2024-04-18

[作者简介] 杜玉松, 男, 云南东川人, 昆明学院在读本科生, 研究方向为光电功能材料.

** [通信作者] 杨艳华, 男, 云南昆明人, 昆明学院副教授, 博士, 研究方向为光电功能材料, E-mail: yh_yangkmu@126.com.

[基金项目] 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项项目 (ZX20230278); 云南省教育厅科学研究基金研究生项目 (2024Y757); 2024 年国家级大学生创新计划训练项目 (202411393015).

司, 有机试剂购自云南利妍科技有限公司, 提纯用试剂纯度为化学纯, 测试用试剂纯度为光谱级. 化学纯二氯甲烷用无水氯化钙干燥 24 h 后, 用氢化钙常压蒸馏, 得到无水二氯甲烷, 备用.

使用 BrukerAvance II-400 型核磁共振仪和天光新光学 RY-1G 型熔点仪测试化合物的核磁共振图谱和熔点; 岛津 UV-2450 型紫外-可见分光光度计和安捷伦 Cary Eclipse 型荧光分光光度计分别测试化合物的紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱, 化合物的测试浓度为 1×10^{-5} mol/L.

1.2 实验步骤

实验合成路线如图 1 所示, 其中, 4-(10H-吩噻嗪-10-基)苯胺(PTZ-NH₂) 根据文献[6]合成, 合成过程不再赘述. 5-溴水杨醛与 4-(二苯基氨基)苯基硼酸经 Suzuki 反应制备出 4'-(二苯基氨基)-4-羟基-[1,1'-联苯]-3-甲醛(TPA-CHO), 再与 PTZ-NH₂ 经亲核缩合反应合成化合物 PTZ-TPA. 在核磁氢谱中, -OH 和 -CH=N- 的化学位移 (δ) 分别出现在 12.93 和 9.12. 化合物 PTZ-TPA 与三氟化硼经配位反应, 得到目标化合物 PTZ-TPA BF₂, 此时, -OH 的 δ 消失. 由于二氟化硼部分的吸电子特性, 相邻的 -CH=N- 基团中, C 原子周围的电子密度下降, 对 H 的磁屏蔽减小, δ 变大, 位移至低场方向的 9.34. 具体合成路线和核磁表征数据, 如下所示.

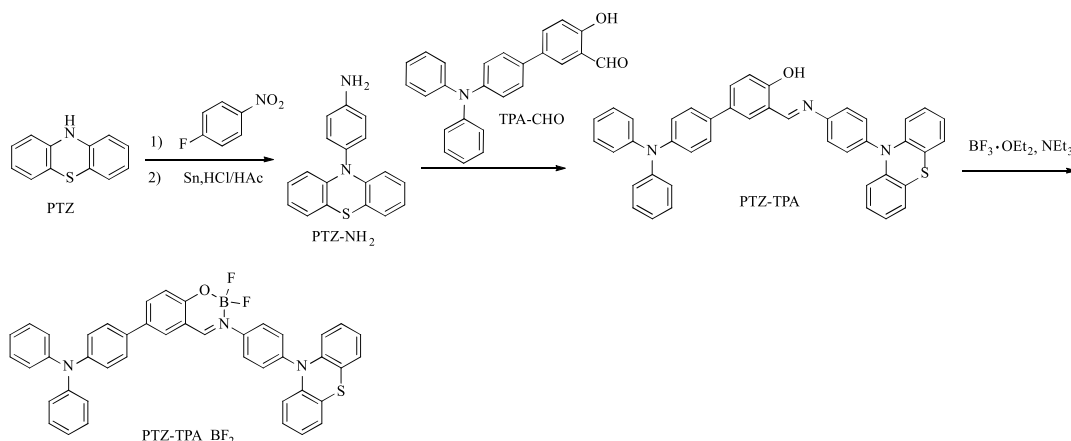


图 1 化合物 PTZ-TPA BF₂ 的合成路线

1.2.1 化合物 3-(((4-(10H-吩噻嗪-10-基)苯基)亚胺基)甲基)-4'-(二苯基氨基)-[1,1'-联苯]-4-醇(PTZ-TPA)的合成

氮气保护下, 100 mL 三口烧瓶中依次加入化合物 TPA-CHO (0.94 g, 2.58 mmol)、PTZ-NH₂ (0.823 g, 2.66 mmol) 和乙醇 (40 mL), 50 °C 搅拌 1 h, 升温至 80 °C 继续搅拌 24 h. 冷却至室温, 析出大量固体, 抽滤, 乙醇冲洗滤饼. 柱层析提纯 (二氯甲烷/正己烷, 1/6, V/V), 得 1.35 g 化合物 PTZ-TPA (C₄₃H₃₁N₃OS), 产率: 82.1%, 熔点: 205 °C. ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆, δ): 12.93 (s, 1H, -OH), 9.12 (s, 1H, -CH=N-), 8.00 (s, 1H, ArH), 7.75 (dd, J = 23.6 Hz, 11.6 Hz, 3H, ArH), 7.61 (d, J = 8.4 Hz, 2H, ArH), 7.52 (d, J = 8.0 Hz, 2H, ArH), 7.34 (t, J = 8.0 Hz, 4H, ArH), 7.12 ~ 7.04 (m, 10H, ArH), 6.99 (t, J = 6.8 Hz, 3H, ArH), 6.91 (t, J = 7.2 Hz, 2H, ArH), 6.30 (d, J = 8.0 Hz, 2H, ArH). ¹³C-NMR (101 MHz, DMSO-d₆, δ): 164.68, 159.98, 148.28, 147.60, 146.76, 144.00, 139.52, 133.94, 131.85, 131.55, 131.37, 130.52, 130.05, 127.84, 127.57, 127.25, 124.42, 124.26, 123.57, 123.39, 120.33, 120.06, 117.75, 116.92.

1.2.2 4-(3-(4-(10H-吩噻嗪-10-基)苯基)-2,2-二氟-2H-2λ4,3λ4-苯并[e][1,3,2]氧杂硼烷-6-基)-N,N-二苯基苯胺(PTZ-TPA BF₂)的合成

100 mL 三口烧瓶中依次加入化合物 PTZ-TPA (0.50 g, 0.729 mmol)、无水二氯甲烷 (25 mL) 和三乙胺 (1 mL), 室温下搅拌 10 min 后, 滴加三氟化硼乙醚溶液 (1 mL), 继续搅拌 24 h. 依次用饱和碳酸氢钠溶液 (3 × 50 mL) 和蒸馏水 (100 mL) 萃取, 收集有机层, 用旋转蒸发仪旋除有机溶剂, 柱层析提

纯 (二氯甲烷/正己烷, 1/6, V/V), 得 0.105 g 化合物 PTZ-TPA BF₂ (C₄₃H₃₀BF₂N₃OS), 产率: 21.0%, 熔点: 167 °C. ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆, δ): 9.34 (s, 1H, -CH=N-), 8.11 (dt, *J* = 10.4 Hz, 2.4 Hz, 2H, ArH), 7.92 (d, *J* = 8.8 Hz, 2H, ArH), 7.61 (t, *J* = 5.2 Hz, 4H, ArH), 7.36 (t, *J* = 8.4 Hz, 5H, ArH), 7.23 ~ 7.19 (m, 2H, ArH), 7.10 (t, *J* = 8.4 Hz, 10H, ArH), 6.99 (dt, *J* = 7.2 Hz, 1.2 Hz, 2H, ArH), 6.45 (dd, *J* = 8.4 Hz, 1.2 Hz, 2H, ArH). ¹³C-NMR (101 MHz, DMSO-*d*₆, δ): 163.04, 159.02, 147.59, 147.49, 140.41, 139.83, 138.18, 133.61, 132.54, 129.37, 129.17, 127.24, 127.10, 125.45, 124.61, 123.73, 123.24, 120.55, 120.48, 120.12, 119.49, 116.02, 109.62. ¹⁹F-NMR (376 MHz, DMSO-*d*₆, δ): -132.28, -132.31.

2 结果与讨论

2.1 紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱

从图 2 中可知, 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在 3 种极性不同的有机溶剂中都只有一个吸收峰, 可归属为三苯胺和吩噻嗪基团与二氟化硼部分间的分子内电荷跃迁. 且该吸收峰的波长随溶剂极性增加略微蓝移, 这可能是由于化合物 PTZ-TPA BF₂ 中含有的氮原子和氧原子具有孤对电子, 基态时易于极性溶剂形成分子间氢键, 降低基态能量, 使基态和激发态间的带隙变大, 电子跃迁所需能量升高, 观察到吸收光谱蓝移^[7]. 为进一步证实分子内电荷跃迁, 测试了荧光发射光谱, 结果如图 3 所示 (激发波长 320 nm). 随正己烷、氯苯和乙腈极性的增加, 荧光发射波长红移明显, 说明溶剂极性的增加使分子内 π 电子离域化程度增加, 处于激发态的 π 电子从第一单重激发态的最低振动能级跃迁回基态的能垒减小, 观察到发射波长红移^[8], 这是典型的分子内电荷跃迁行为.

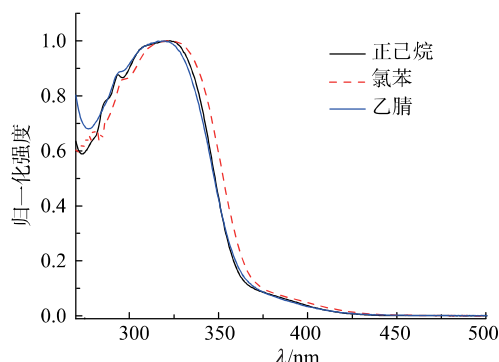


图 2 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在 3 种不同极性溶剂中的紫外-可见吸收光谱

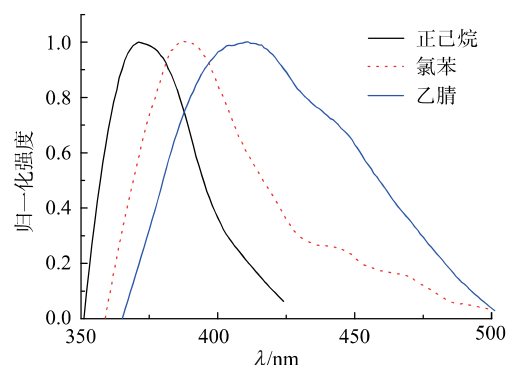


图 3 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在 3 种不同极性溶剂中的荧光发射光谱

为了更好地解释溶剂极性对荧光发射光谱的影响, 以 3 种有机溶剂的取向极性参数 (Δf) 为横坐标, Stokes 位移 ($\Delta\nu$) 为纵坐标, 绘制 Lippert-Mataga 曲线, 相关数据陈列于表 1 中. 从图 4 中可知, 拟合曲线有一个较好的线性相关度 ($R^2 = 0.97$), 这表明依赖于溶剂的荧光发射是有机溶剂和化合物分子间的偶极-偶极相互作用引起的^[9]. 此外, 拟合曲线显示的斜率值为正数 ($6\,398.36\text{ cm}^{-1}$), 表明基态与激发态间的偶极矩差异性较大^[10], 同时, 大的斜率值证实了较强的分子内电荷跃迁的存在.

表 1 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在不同极性有机溶剂中的光物理数据

溶剂	吸收波长/nm	发射波长/nm	$\Delta\nu/(10^3\text{ cm}^{-1})$	$\Delta f(n, \varepsilon)$
正己烷	323	379	4.575	-0.068 0(1.374 9, 1.58)
氯苯	322	388	5.283	0.022 2(1.524, 2.58)
乙腈	320	411	6.919	0.305 5(1.344, 37.5)

注: $\Delta\nu$ 为 Stokes 位移, 其数值为最大吸收峰波数与发射峰波数的差值; n 为光学折射率, ε 为介电常数, 根据下列公式计算得出 Δf (有机溶剂的取向极性参数):

$$\Delta f = \frac{\varepsilon - 1}{2\varepsilon + 1} - \frac{n^2 - 1}{2n^2 + 1}.$$

2.2 AIE 研究

为了进一步探索化合物 PTZ-TPA BF₂ 的荧光性能, 在四氢呋喃(良溶剂)/水(不良溶剂)混合溶剂中测试其 AIE 活性, 实验结果如图 5 所示(激发波长 351 nm)。随着含水量的增加, 荧光发射强度变化不大, 这主要是由于化合物 PTZ-TPA BF₂ 以单分子形式分散地溶解在混合溶剂中^[11]。当含水量增加至 60% 时, 荧光强度开始变大, 含水量达 70% 时, 荧光强度显著增强, 如图 6 所示。这主要是由于不良溶剂水的增加, 分散的化合物 PTZ-TPA BF₂ 逐渐团簇在一起并形成聚集体, 围绕 C-C 单键的分子内自由旋转受限导致的^[12]。而随着含水量进一步增加, 荧光强度却逐渐减弱, 表明因不良溶剂水的含量持续上升, 化合物溶解性下降, 导致混合溶剂中 PTZ-TPA BF₂ 的浓度降低^[13]。

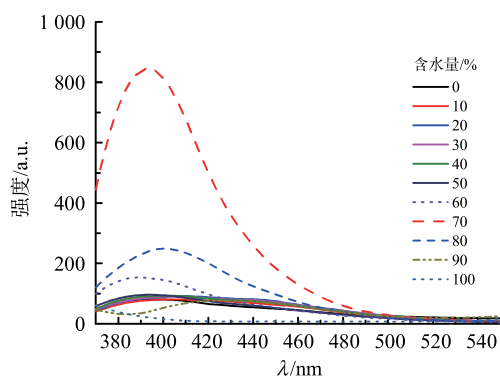


图 5 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在含水量不同的四氢呋喃/水混合溶剂中的荧光发射光谱

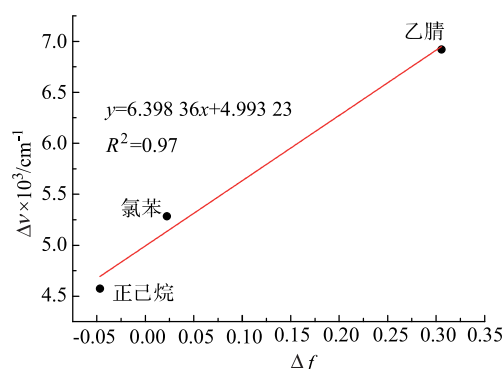


图 4 化合物 PTZ-TPA BF₂ 的 Lippert-Mataga 曲线

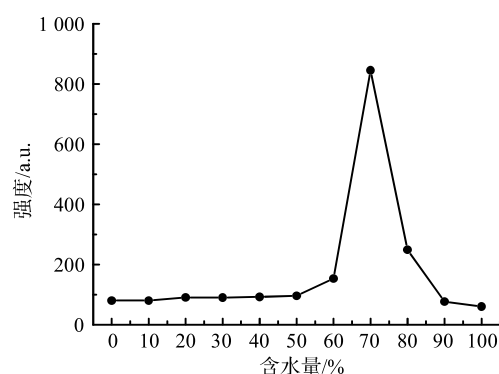


图 6 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在含水量不同的四氢呋喃/水混合溶剂中的荧光强度

为更好地理解化合物 PTZ-TPA BF₂ 在四氢呋喃/水混合溶剂中的聚集行为, 测试其相同条件下的紫外-可见吸收光谱, 结果如图 7 所示。随含水量的增加, 化合物的吸收峰强度有变化, 但峰形保持不变, 说明化合物在低含水量混合溶剂中以单分子形式存在。当含水量达到 60% 时, 吸收尾部上移, 表明聚集体已经形成, 当入射光照射溶液时, 发生光的散射, 进而引起拖尾现象^[14]。当含水量为 70% 时, 整个吸收峰型上移明显且宽化, 表明存在大量聚集体。当含水量在 80% 以上时, 吸收峰红移且强度下降, 这主要由聚集体的米氏效应引起。

2.3 量子化学计算结果

为了更好地解释观测到的光学性能, 运用高斯 16 软件程序^[15], 采用 Kohn-Sham 密度泛函理论, 在 B3LYP/6-31G(d, p) 水平上对化合物 PTZ-TPA BF₂ 的基态几何结构进行了优化, 结果如图 8 所示。在 CAM-BLYP/6-31G(d, p) 上进行含时密度泛函理论计算^[16], 得到化合物 PTZ-TPA BF₂ 的前线轨道、基态和激发态的静电势表面及其偶极矩, 结果如图 9 和图 10 所示。从图 8 可知, 吩噻嗪部分的两个苯环间二面角为 99.07°, 吩噻嗪部分的六元杂环与桥连苯基间的二面角为 118.27°, 与硼配位的水杨醛亚胺部分与桥连苯基间的二面角为 119.69°, 与水杨醛亚胺相邻的苯环与三苯胺基团苯环间的二面角为 121.71°。并且, 三苯胺部分具有非共面的螺旋桨型构象。以上结果表

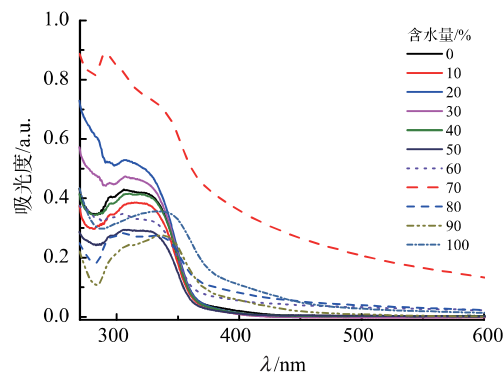
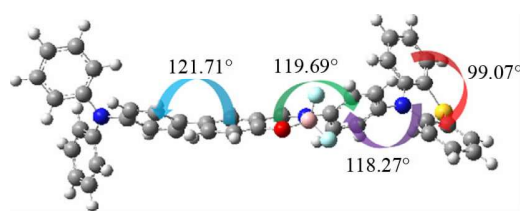
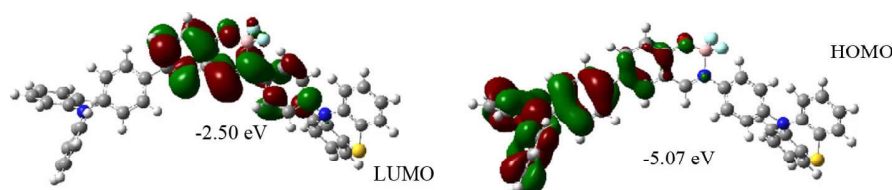
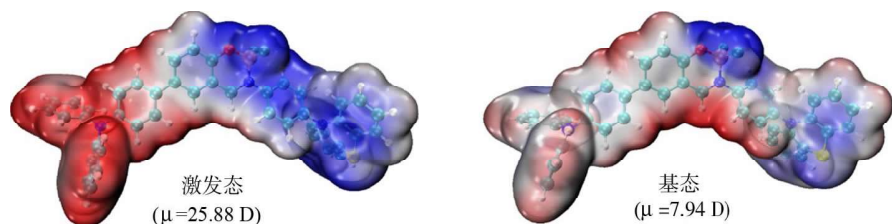


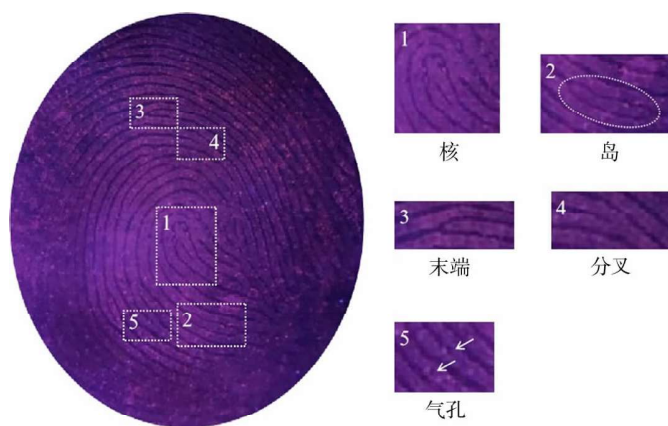
图 7 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在含水量不同的四氢呋喃/水混合溶剂中的紫外-可见吸收光谱

明, 化合物 PTZ-TPA BF₂ 具有扭曲的非共面结构, 可有效阻碍分子间紧密的 $\pi-\pi$ 堆积作用, 有利于 AIE 活性的产生, 这与图 5 测试结果一致. 从图 9 可知, 最高电子占据分子轨道 (HOMO) 分布于三苯胺部分, 而最低未占据分子轨道 (LUMO) 分布于与硼配位的水杨醛亚胺部分及其周围苯环. 前线轨道结果表明, 分离的 HOMO 与 LUMO 能级有利于分子内电荷跃迁的出现, 这与图 2 和图 3 测试结果一致. 此外, HOMO 能级主要位于三苯胺部分, 说明三苯胺基团的供电子特性强于吩噻嗪基团. 从图 10 可知, 基态时, 负静电势表面 (蓝色) 主要位于二氟化硼部分, 正静电势表面 (粉红色) 分布于整个分子中, 此时的偶极矩 (μ) 为 7.94 D. 激发态时, 负静电势表面扩散至吩噻嗪部分, 正静电势表面主要位于三苯胺部分, μ 增大至 25.88 D, 这与图 4 结论一致.

图 8 化合物 PTZ-TPA BF₂ 的最优构象图 9 化合物 PTZ-TPA BF₂ 的前线分子轨道图 10 化合物 PTZ-TPA BF₂ 在基态和激发态时的静电势表面和偶极矩

2.4 潜指纹成像研究

由于化合物 PTZ-TPA BF₂ 在四氢呋喃/水混合溶剂中优异的 AIE 性能, 探究其在潜指纹成像领域的应用. 通过前期探索, 得出化合物 PTZ-TPA BF₂ 的四氢呋喃/水混合溶剂作为显影剂的最优条件: 溶液浓度为 1×10^{-3} mol/L, 含水量为 70%. 志愿者清洗双手后, 在洁净的玻璃板上按压留下潜指纹, 将配置的显影剂喷洒在按压区域, 半小时后蒸馏水清洗, 晾干. 在 365 nm 紫外灯照射下使用小米 10S 手机拍照, 结果如图 11 所示. 从照片中可以清晰地识别出部分一级 (核)、二级 (岛、末端、分叉) 和三级 (气孔) 等指纹特征细节. 其中, 识别的三级特性是判别个人信息的定量数据. 因此, 基于化合物的显影剂可提供初步证据来证实个人信息.

图 11 化合物 PTZ-TPA BF₂ 为显影剂的玻璃板潜指纹图及其部分区域特征放大图

3 结 论

本文合成了一种含有三苯胺和吩噻嗪基团的二氟硼化合物, 并通过核磁共振进行表征. 在 3 种不同极性有机溶剂中的光学测试结果表明, 该化合物具有分子内电荷跃迁性能. 在四氢呋喃/水混合溶剂中的测试结果表明, 该化合物具有 AIE 活性. 量子化学计算结果表明, 扭曲的非共面构型和分离的 HOMO 与 LUMO 能级是产生 AIE 活性和分子内电荷跃迁的主要原因. 基于该化合物优异的 AIE 活性, 制备的显影剂可清晰地识别玻璃板上的潜指纹.

[参考文献]

- [1] 徐茂财, 陈艳琴, 王甫鹏, 等. 氟硼类力致荧光变色材料研究进展 [J]. 廊坊师范学院学报 (自然科学版), 2022, 22 (3): 63-68.
- [2] ZHAN L, NING W, GONG S, et al. Difluoroboron locking tactic enhances photo- and electroluminescence of TADF emitter [J]. Dyes and Pigments, 2021, 192: 109392.
- [3] MI W, QU Z, SUN J, et al. Pyrimidine-containing β -iminoenolate difluoroboron complexes acting as non-traditional π -gelators and mechanofluorochromic dyes [J]. New Journal of Chemistry, 2018, 42 (15): 12882-12890.
- [4] 王甫鹏, 田佳壮, 杨艳华, 等. 三苯胺基取代的吡啶基二氟硼配合物力致荧光变色及无墨书写测试 [J]. 高等学校化学学报, 2023, 44 (11): 182-188.
- [5] XU M, TIAN J, YANG Y, et al. Reversible mechanofluorochromic and data security protection of a triphenylamine-based difluoroboron luminescent compound [J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2023, 43 (5): 1824-1831.
- [6] 张帮翠, 何秀娟, 徐茂财, 等. 一种含有吩噻嗪基团的二氟硼化合物荧光性能研究 [J]. 云南民族大学学报 (自然科学版), 2023, 32 (3): 312-317.
- [7] 朱鹏, 陈艳琴, 钱涵, 等. 酮肟化合物与酰胺衍生物的合成及光谱学性能研究 [J]. 昆明学院学报, 2023, 45 (3): 58-62.
- [8] 杨艳华, 李学良, 田佳壮, 等. 含有 3, 5-二甲基的吡啶基二氟硼化合物力致荧光变色性能研究 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2023, 50 (5): 48-58.
- [9] ZHAO F, SUN T, WANG Y, et al. Donor-acceptor type π -conjugated diphenylsulfone derivatives showing diverse fluorescence response to mechanical force [J]. Dyes and pigments, 2021, 194: 109542.
- [10] ZHANG F, LIANG X, LI D, et al. Utilizing the heterocyclic effect towards high contrast ratios of mechanoresponsive luminescence based on aromatic aldehydes [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7 (39): 12328-12335.
- [11] WANG Y, LIU W, REN L, et al. Deep insights into polymorphism initiated by exploring multicolor conversion materials [J]. Materials Chemistry Frontiers, 2019, 3 (8): 1661-1670.
- [12] 李学良, 钱涵, 马金文, 等. 苯蔡基团修饰的吡啶基二氟硼化合物光学性能研究 [J]. 昆明学院学报, 2023, 45 (6): 64-69.
- [13] 张帮翠, 陈艳琴, 窦思虎, 等. 一种含有呋唑基团的荧光化合物光学性能研究 [J]. 昆明学院学报, 2022, 44 (6): 54-59.
- [14] 沈舒婷, 于坤, 王亚轩, 等. 具有不同构型和聚集诱导发光性质化合物的合成及性质 [J]. 杭州师范大学学报 (自然科学版), 2023, 22 (2): 120-125.
- [15] FRISH M J, TRUCKS G W, SCHLEGEL H B, et al. Gaussian 16 Rev. A.03 [M]. Wallingford M: Gaussian, 2016.
- [16] YANAI T, TEW D P, HANDY N C. A new hybrid exchange-correlation functional using the Coulomb-attenuating method (CAM-B3LYP) [J]. Chemical Physics Letters, 2004, 393 (1): 1-57.

(下转第 86 页)

- zation [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2021, 25 (1): 48-60.
- [7] ZHENG Q, LI J, DONG B, et al. , Multi-objective optimization algorithm based on BBO for virtual machine consolidation problem [C]//IEEE. 2015 IEEE 21st International Conference on Parallel & Distributed Systems (ICPADS). Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2015: 414-421.
- [8] BELOGLAZOV A, BUYYA R. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2012, 24 (13): 1397-1420.
- [9] 黄鸿华. 基于 Visual C++ 的装箱问题的 BF 算法 [J]. 电脑知识与技术, 2018, 14 (36): 258-259.
- [10] TIAN F, ZHANG R, LEWANDOWSKI J, et al. , Deadlock-free migration for virtual machine consolidation using Chicken Swarm Optimization algorithm [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2017, 32 (2): 1389-1400.
- [11] ZHENG Q, LI R, LI X, et al. A multi-objective biogeography-based optimization for virtual machine placement [C]//IEEE. 2015 15th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Shenzhen, China: IEEE, 2015: 687-696.
- [12] GAO Y, GUAN H, QI Z, et al. A multi-objective ant colony system algorithm for virtual machine placement in cloud computing [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013, 79 (8): 1230-1242.

Algorithm for Virtual Machine Consolidation Based on Initial Population Optimization Strategy

ZHANG Rong, LI Haiyan

(School of Information Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

Abstract: Heuristic algorithms based on population updating strategies are commonly used for solving multi-objective virtual machine consolidation problems. However, most of these algorithms do not consider the optimization of the initial population, leading to slow convergence. To address this slow convergence issue, this paper takes the genetic algorithm as an example and proposes a multi-objective sensitive initial population generation method, with the core idea of analyzing the resource characteristics of each target and establishing a constrained model for optimizing the initial population and improving its quality. Experimental results show that this method significantly improves the search performance of the genetic algorithm, and is better than the other two improved strategies.

Key words: virtual machine consolidation; genetic algorithm; initial population; bin-packing

(责任编辑: 陈伟超)

(上接第 61 页)

Research on the Optical Properties and Latent Fingerprint Imaging of a Triphenylamine-Based Difluoroboron Compound

DU Yusong, CHEN Chunlin, DONG Guanchen, TIAN Jiazhuang, GAO Shulin, YANG Yanhua

(Yunnan Key Laboratory of Metal-Organic Molecular Materials and Devices, School of Chemistry and Chemical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

Abstract: The difluoroboron compounds not only exhibit excellent photophysical properties, but also have wide applications in the field of optoelectronic functional materials. In order to further explore the application, a difluoroboron compound containing triphenylamine and phenothiazine groups was synthesized using phenothiazine as raw material orderly through nucleophilic substitution reaction, reduction reaction, nucleophilic condensation reaction, and coordination reaction. The measurement results in different polar organic solvents and tetrahydrofuran/water mixtures showed that it has intramolecular charge transition characteristics and aggregation-induced emission active, and the experimental results were explained by quantum chemical calculations. In addition, it can serve as a developer to image latent fingerprint on glass plates, as well as clearly identify partial first, second, and third fingerprint feature details of latent fingerprint.

Key words: phenothiazine; difluoroboron compound; aggregation-induced emission; latent fingerprint imaging

(责任编辑: 陈伟超)