

基于 Rhodol 衍生物的电响应多重手性光学开关体系

王彤彤, 王铁峰, 许斐, 于洋

(嘉兴南湖学院新材料工程学院, 嘉兴 314001)

摘要 通过在兼具酸碱响应变色的 3'-氨基-6'-羟基-螺[异苯并呋喃-1(3H)9'-[9H]氧杂蒽]-3-酮(Rhodol)衍生物主体上引入手性苯胺结构, 制备了兼具酸碱响应特性的手性光学开关. 然后, 基于质子耦合电子转移机制, 将其与电致酸/碱分子结合, 开发了一种新型的电响应多重手性光学开关体系. 在合适的电压控制下, 该体系的圆二色光谱可在 3 种状态之间发生可逆切换: 初始可见光波段无圆二色光谱信号, 较大正电压下产生正圆二色光谱信号, 较大负电压下产生负圆二色光谱信号, 较小反向电压可恢复至初始状态. 本文开拓了一种构建电响应多重手性光学开关体系的新路径, 为多重手性光学开关材料的设计与应用提供了思路.

关键词 质子耦合电子转移; 多重手性开关; 电响应; 电致酸/碱

中图分类号 O626

文献标志码 A

doi: 10.7503/cju20240118

An Electrically Responsive Multiple Chiroptical Switching System Based on a Rhodol Derivative

WANG Tongtong, WANG Tiefeng, XU Fei, YU Yang*

(College of Advanced Materials Engineering, Jiaxing Nanhu University,
Jiaxing 314001, China)

Abstract In this study, a chiral aniline structure was introduced into the 3'-amino-6'-hydroxyspiro[2-benzofuran-3, 9'-xanthen]-1-one (Rhodol) derivative main molecule, which exhibits pH (acid and base)-responsive color changes. Then, based on the proton-coupled electron transfer mechanism, a novel electrically responsive multiple chiroptical switching system was constructed by integrating the functional Rhodol derivative with electro-acid/base molecules. Controlled by suitable voltages, this system could switch among three circular dichroism absorption states reversibly: in the visible light range, no circular dichroism signal at the initial state, positive circular dichroism signal under a significant positive voltage, and negative circular dichroism signal under a considerable negative voltage. More importantly, all the switching processes were totally reversible. This research opens a new route to achieve the development of electrically responsive multiple chiroptical switching systems, and offers an important insight on the design and application of innovative materials for multiple chiroptical switches.

Keywords Proton-coupled electron transfer; Multiple chiroptical switch; Electrically response; Electro-acid/base

电响应的手性光学开关作为一类特殊的智能光学调控材料, 在合适的电场作用下, 其手性光学性质(旋光度和圆二色性等)会发生稳定且可逆的切换^[1-4]. 与其它刺激方式(光、温度和机械力等)调控的

收稿日期: 2024-03-12. 网络首发日期: 2024-04-17.

联系人简介: 于洋, 女, 博士, 讲师, 主要从事智能光学材料与器件方面的研究. E-mail: yuyang@jxnhu.edu.cn

基金项目: 嘉兴市公益性研究计划(批准号: 2023AY11016)和嘉兴南湖学院高层次人才启动经费(批准号: QD61220019, QD61220017)资助.

Supported by the Public Welfare Research Plan of Jiaxing City, China(No.2023AY11016) and the Start-up Funds of Jiaxing Nanhu University, China(Nos.QD61220017, QD61220019).

手性光学开关相比, 此类材料在构筑光电器件方面具有显著优势, 适于实际应用^[5-7]. 基于上述特性, 电响应的手性光学开关在光学通讯和圆偏振光调制等领域展现出广阔的应用前景^[8-11].

目前已开发的电响应手性光学开关的设计思路通常是手性发色团接枝到具有电化学氧化还原活性的结构中, 如手性联萘官能团修饰的紫精类衍生物^[12]、含有手性碳原子的聚噻吩衍生物薄膜^[13]以及近年来新兴的含有电化学活性官能团的手性轮烷^[14]和手性柱芳烃^[15]等. 然而, 由于本征电化学性质的限制, 当前的手性光学开关一般只能在两种手性状态下进行切换^[16-18]. 在一些特殊的应用场景, 如多重手性光学调制和多级信息加密等方面难以应用. 因此, 亟需开发新型的手性光学开关材料, 构建电响应的多重手性光学开关体系, 并拓展其应用范围.

近年来, 一类基于酸/碱响应染料开发的智能手性开关体系受到关注, 其具有丰富可调的手性光学性质、稳定可逆的电调控性能以及独特的双稳态特性^[19,20]. 此类手性开关材料主要基于质子耦合电子转移机理进行设计开发^[21-26]: 在电场作用下, 一些特殊的电化学活性分子能发生可逆的电化学氧化/还原反应, 在反应过程中会释放质子或者夺取体系中的质子, 引起体系酸性或者碱性的增强, 这些分子被称为“电致酸/碱”. 当“电致酸/碱”与一些酸/碱响应的手性光学开关染料存在于同一体系时, 即可通过施加“电致酸/碱”的氧化还原电位可逆地调控染料的手性光学性质. 因此, 基于此原理设计合成与“电致酸/碱”相匹配, 且具有多重手性光学开关性质的酸/碱响应手性开关, 是实现电响应多重手性光学开关的关键.

本文将手性苯胺以共价键形式引入具有酸/碱双响应的染料 3'-氨基-6'-羟基-螺{异苯并咪喃-1(3H)9'-[9H]氧杂蒽}-3-酮(Rhodol)衍生物中, 设计合成了一种酸/碱双响应的手性光学开关分子(手性 Rhodol 衍生物, 6'-(二乙基氨基)-4'-{[(E)-[(1R)-1-苯基乙基]氮正离子亚基自由基]甲基}-3-氧亚基-3H-螺[2-苯并咪喃-1,9'-咕吨]-3'-醇根离子, R-A), 并将其与“电致酸”分子{氨基脲类衍生物, N-[4-(二甲基氨基)苯基]-1-[(4-甲基苯基)氨基]甲烷酰胺, U-N}以及“电致碱”分子(2,3-二甲氧基-5-甲基-1,4-苯醌, 辅酶 Q0, C-Q0)复合于同一电解质溶液中, 开发了一类新型的电响应多重手性光学开关体系. 通过施加合适的电压, 该体系会发生 3 种不同的圆二色光谱(CD)信号之间的可逆切换, 同时伴随着不同颜色的可逆变化.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

4-二乙基氨基酮酸(纯度 $\geq 98\%$)、间苯二酚(纯度 $\geq 99\%$)、三氟乙酸(CF_3COOH , 纯度 $\geq 99\%$)、*R*-(+)- α -甲基苄胺(纯度 $\geq 98\%$)、四丁基氢氧化铵[TBAOH, 纯度 25%(质量分数)的水溶液]、*N,N*-二甲基-1,4-苯二胺(纯度 $\geq 97\%$)、2,3-二甲氧基-5-甲基-1,4-苯醌(辅酶 Q0, C-Q0, 纯度 $\geq 98\%$)、二茂铁(Fc , 纯度 $\geq 98\%$)、四丁基六氟磷酸铵(TBAPF_6 , 纯度 $\geq 98\%$)及 4-甲基异氰酸酯(纯度 $\geq 97\%$), 安耐吉化学&3A(安徽泽升科技有限公司); 六亚甲基四胺(纯度 $\geq 99\%$), 上海阿拉丁试剂有限公司; 无水乙醇、二氯甲烷(CH_2Cl_2)、甲醇和乙腈(CH_3CN), 色谱纯, 上海阿达玛斯试剂有限公司; 其中, TBAPF_6 在使用前以无水乙醇为溶剂重结晶 3 次, 其它试剂均可直接使用.

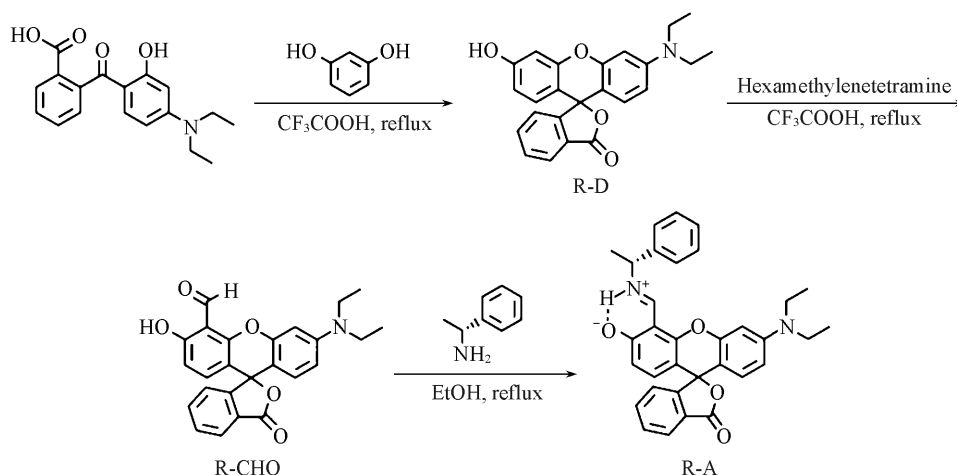
As 400 型核磁共振波谱仪(NMR), 以氘代二甲基亚砷(DMSO)为溶剂, 四甲基硅烷(TMS)为内标, 武汉中科牛津公司; Agilent 1290-microTOF-Q II 型高分辨质谱仪(HRMS), 德国安捷伦公司; SP-150 型电化学工作站, 法国 Bio-logic 公司; UV-2550PC 型紫外-可见分光光度计(UV-Vis), 日本岛津公司; Chiralscan Plus V100 型圆二色光谱仪(CD), 英国光物理公司.

1.2 实验过程

1.2.1 R-A 的合成 R-A 的合成路线如 Scheme 1 所示.

参照文献^[22]方法合成 Rhodol 衍生物 {6'-(二乙基氨基)-3'-羟基-3H-螺[2-苯并咪喃-1,9'-咕吨]-3-酮, R-D, Scheme 1}.

将 10.0 mmol R-D 和 11.0 mmol 六亚甲基四胺混合后置于 100 mL 圆底烧瓶中, 加入 40 mL

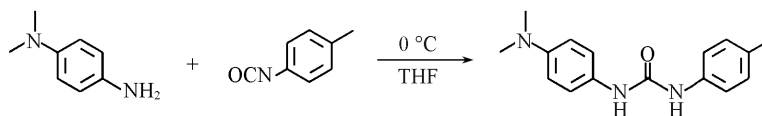


Scheme 1 Synthetic route of the pH-sensitive chiroptical switch(R-A)

CF_3COOH 作为反应溶剂,将反应体系加热至 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 并在搅拌下反应12 h.向上述反应体系中加入10 mL去离子水,于 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 继续反应2 h.反应结束后待体系冷却至室温后,旋转蒸发除去溶剂.将所得固体产物溶解于 CH_2Cl_2 中,用饱和碳酸氢钠水溶液洗涤3次,收集有机相;除去 CH_2Cl_2 后得到粗产品,经柱层析法纯化得到橙色固体产物6'-(二乙基氨基)-3'-羟基-3-氧亚基-3H-螺[2-苯并呋喃-1,9'-咕吨]-4'-甲醛(R-CHO),收率为40%. $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, DMSO), δ : 11.89(s, 1H), 10.68(s, 1H), 8.01(d, $J=7.4\text{ Hz}$, 1H), 7.81(t, $J=7.3\text{ Hz}$, 1H), 7.73(t, $J=7.3\text{ Hz}$, 1H), 7.32(d, $J=7.5\text{ Hz}$, 1H), 6.93(d, $J=8.8\text{ Hz}$, 1H), 6.69(d, $J=7.4\text{ Hz}$, 2H), 6.50(s, 2H), 3.37(d, $J=6.7\text{ Hz}$, 4H), 1.11(t, $J=6.5\text{ Hz}$, 6H); HRMS($\text{C}_{25}\text{H}_{22}\text{NO}_5$ 计算值), m/z : 416.1488(416.1492)[$\text{M}+\text{H}$] $^+$.

将1.0 mmol R-CHO放置于100 mL圆底烧瓶中,加入60 mL无水乙醇使其完全溶解,然后加入1.1 mmol *R*-(+)- α -甲基苄胺并搅拌使其混合均匀,搅拌下将反应体系加热回流10 h.待反应结束后,将体系冷却至室温,经旋转蒸发除去溶剂.所得粗产物经柱层析分离提纯,再经乙腈重结晶,最终得到黄色固体产物R-A,收率为30%. $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, DMSO), δ : 15.19(s, 1H), 9.35(s, 1H), 7.99(d, $J=7.5\text{ Hz}$, 1H), 7.80(t, $J=7.4\text{ Hz}$, 1H), 7.71(t, $J=7.4\text{ Hz}$, 1H), 7.47(d, $J=7.4\text{ Hz}$, 2H), 7.42(t, $J=7.3\text{ Hz}$, 2H), 7.33(d, $J=7.0\text{ Hz}$, 1H), 7.29(t, $J=6.7\text{ Hz}$, 1H), 6.63(d, $J=8.1\text{ Hz}$, 2H), 6.54~6.44(m, 3H), 4.99(d, $J=6.2\text{ Hz}$, 1H), 3.37(d, $J=6.9\text{ Hz}$, 4H), 1.65(d, $J=6.4\text{ Hz}$, 3H), 1.12(t, $J=6.6\text{ Hz}$, 6H); HRMS($\text{C}_{33}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_4$ 计算值), m/z : 519.2273(519.2278)[$\text{M}+\text{H}$] $^+$.

1.2.2 U-N的合成 参照文献[26]方法合成U-N,合成路线如Scheme 2所示.



Scheme 2 Synthetic route of the electro-acid 1-[4-(dimethyl-amino)phenyl]-3-(*p*-tolyl)urea(U-N)

1.2.3 电化学循环伏安(CV)测试 将待测样品与电解质(TBAPF₆)混合,溶解于乙腈中得到测试溶液,待测试样品的浓度为 $1.0\times 10^{-3}\text{ mol/L}$,电解质浓度为 $1.0\times 10^{-1}\text{ mol/L}$.采用三电极体系进行循环伏安测试,测试体系包括玻碳电极(工作电极)、铂丝电极(对电极)及银丝电极(参比电极),扫描速率为100 mV/s.

1.2.4 原位光谱-电化学联用测试 配制含有特定功能分子的电解质溶液,将其加入原位电化学测试比色皿.将比色皿放入光谱仪中,采用三电极体系进行电化学测试,体系包括铂丝网电极(工作电极)、铂丝电极(对电极)以及银/硝酸银电极(参比电极).通过对体系施加不同的电压,监测功能分子在不同氧化还原态下的光谱特征,进而对其结构变化进行实时测定与分析.

2 结果与讨论

2.1 酸碱响应多重手性光学开关(R-A)的制备及性质

根据质子耦合电子转移机制与可逆电致酸/碱方法,开发酸/碱双响应的手性光学开关分子是构建电响应多重手性光学开关体系的关键.基于上述理念,首先通过醛-胺脱水缩合反应在酸/碱双响应的变色分子 Rhodol 衍生物(R-D)主体中引入手性苯胺发色团(Scheme 1),得到了酸/碱双响应的手性光学开关分子(R-A)并测试了其响应性质.

由图 1(A)可见,R-A 在中性溶剂(乙腈)中时,可见光波段无 CD 信号;向体系中加入化学酸 CF_3COOH 后,可见光波段(峰位 532 nm)产生了正向的 CD 信号,并且随着 CF_3COOH 加入量的增加,CD 信号逐渐提高,该过程中伴随着颜色从无色到粉色的切换[图 1(B)].而向体系中加入化学碱 TBAOH 时,可见光波段(峰位 516 nm)产生了负向的 CD 信号[图 1(C)],并且随着 TBAOH 加入量的增加,CD 信号逐渐增强,该过程中伴随着颜色从无色到黄色的切换[图 1(D)].上述结果表明,R-A 分子具有酸/碱双响应手性光学开关特性,在酸与碱的分别调控下,可见光波段可实现“无 CD 信号”、“正 CD 信号”及“负 CD 信号”3 种手性状态之间的可逆切换.

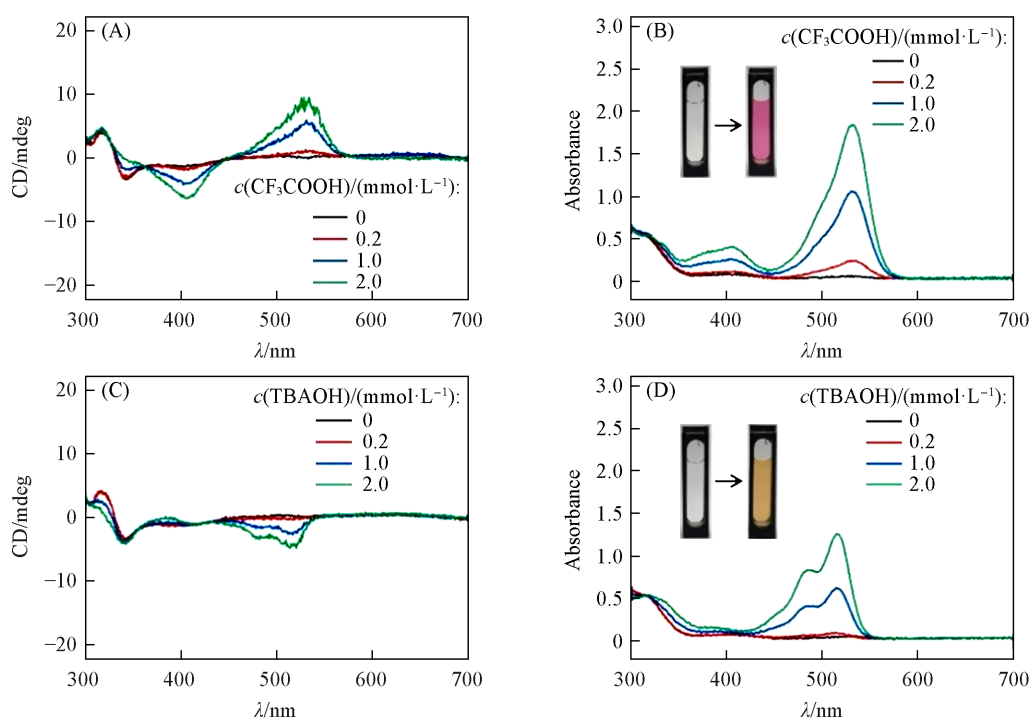


Fig. 1 Acid and base-responsive chiroptical switching property of R-A

CD(A, C) and UV-Vis absorption(B, D) spectra of 2.0×10^{-4} mol/L R-A when added different concentrations of CF_3COOH (A, B) and TBAOH (C, D) in CH_3CN , respectively. Insets: photographs of 2.0×10^{-4} mol/L R-A before and after the addition of CF_3COOH (B) and TBAOH (D) in CH_3CN , respectively.

进一步通过核磁共振波谱分析对 R-A 加酸/碱后的结构变化进行了验证.由图 2 可见,当 R-A 处于初始中性状态时,由于分子内氢键的存在,在低场区有 2 个特征氢.当溶液中加入酸后,1 号 H 与 2 号 H 发生了位移,并伴随着 3 号 H 的出现.这一结果表明加酸后发生开环,得到了具有羧基的酸式结构,此时分子内氢键未被破坏,手性构象得以维持.当溶液中加入碱后,1 号 H 失去,分子内氢键被破坏,导致分子的手性构象发生翻转.结合上述数据分析、光谱数据(图 1)以及前期研究结果^[4],酸式开环与碱式开环结构如图 2 所示.酸式开环结构与碱式开环结构具有不同的手性构象,因此,两种结构对应的 CD 光谱在可见光波段展现出不同方向的吸收信号(酸式为正,碱式为负).由于上述两种结构的特征吸收不同,R-A 在酸式与碱式下表现不同的颜色.

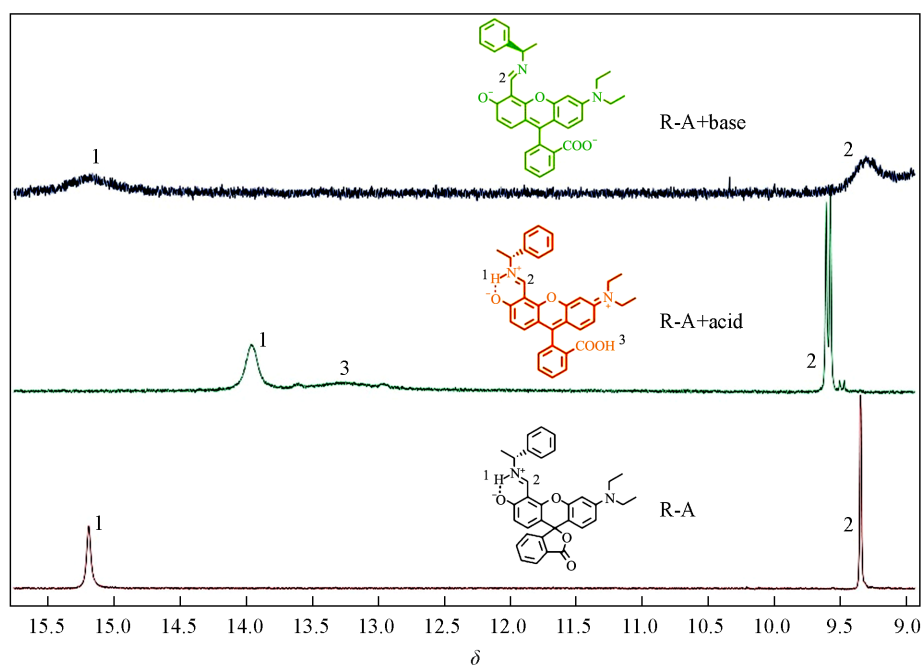


Fig. 2 ^1H NMR spectra and the corresponding structures of R-A, R-A added acid(CF_3COOH) and R-A added base(TBAOH) in deuterated DMSO recorded at 400 MHz

2.2 基于R-A的电响应多重手性光学开关体系的可行性

制备酸/碱响应多重手性光学开关R-A后, 将其与电致酸/碱结合, 探究了基于R-A开发电响应多重手性光学开关体系的可行性. 在该体系中, 电致酸/碱的氧化/还原电位低于R-A对应的氧化/还原电位是多重手性光学开关特性得以实现的前提. 因此, 采用循环伏安法对电致酸(U-N)/碱(C-Q0)与R-A的氧化还原特性进行了研究.

由图3可见, R-A的氧化与还原峰位分别位于1.12和-0.93 V附近, 相同条件下U-N的氧化峰位于+0.50 V, C-Q0的还原峰位于-0.65 V处. 由此可见, 在本体系中电致酸/碱的氧化/还原电位明显低于R-A的氧化/还原电位. 这一性质确保在U-N/C-Q0发生可逆氧化/还原诱导R-A中可逆得到/失去质子的过程中, R-A自身不会发生氧化/还原导致化学结构发生变化. 以上结果表明, U-N与C-Q0具有可逆的电化学氧化还原性质, 同时有望与R-A结合制备电响应多重手性光学开关体系.

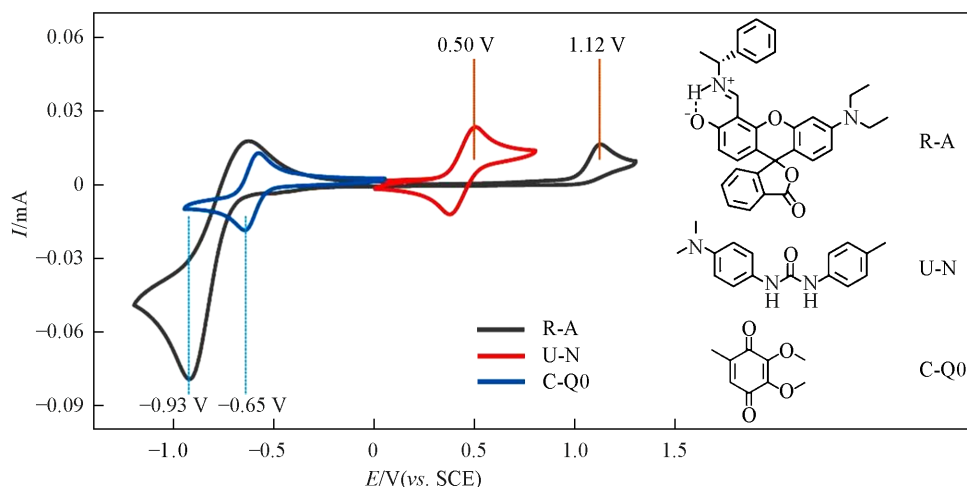


Fig. 3 Cyclic voltammograms of 1.0×10^{-3} mol/L R-A, 1.0×10^{-3} mol/L U-N and 1.0×10^{-3} mol/L C-Q0 with 1.0×10^{-1} mol/L TBAPF₆ in CH_3CN , respectively

Scan rate: 100 mV/s.

2.3 电响应多重手性光学开关的性质

将R-A(酸碱响应多重手性光学开关)与U-N/C-Q0(电致酸/碱)三者置于同一体系中进行结合,构建了电响应多重手性光学开关体系.由图4(A)可见,体系在可见光波段初始无CD信号,当施加U-N的氧化电压时,可见光波段出现正向的CD信号(532 nm),而当施加C-Q0的还原电压时,可见光波段出现负向的CD信号(516 nm).这一CD信号变化行为以及相应的可见吸收光谱变化[图4(B)]与R-A加入酸/碱的变化趋势一致(图1).此外,上述状态的切换完全可逆,在施加较小的反向电压时光谱可恢复至初始状态.

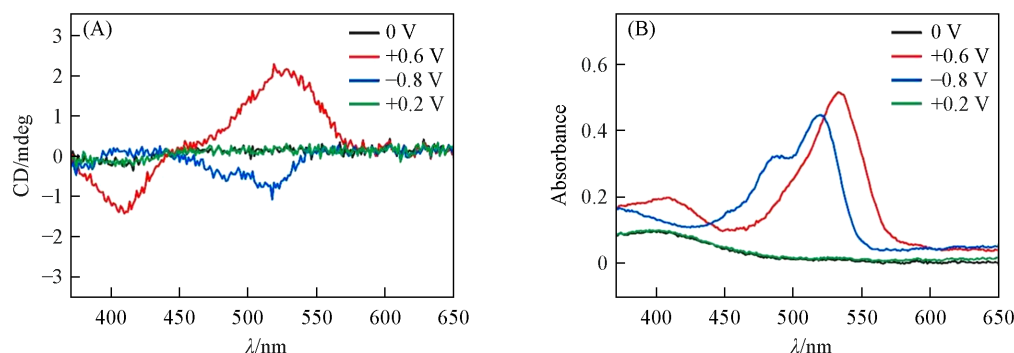


Fig. 4 CD(A) and UV-Vis absorption(B) spectra of the mixture of 2.0×10^{-4} mol/L R-A, 1.0×10^{-3} mol/L C-Q0 and 1.0×10^{-3} mol/L U-N with 1.0×10^{-1} mol/L TBAPF₆ in CH₃CN under various voltages

另外,在体系中分别仅存在R-A, U-N和C-Q0时,对体系施加U-N的氧化电压或C-Q0的还原电压,体系的CD光谱及对应的吸收光谱均未发生变化(图5).这进一步证明了U-N与C-Q0在体系中能分别作为电致酸与电致碱,在电场作用下可逆调控R-A手性光学性质的关键作用.综上所述,通过U-N, C-Q0与R-A的有效结合,一种新型的电响应多重手性光学开关体系已建立.此体系在合适的电场的作用下,可实现“无CD信号”、“正CD信号”以及“负CD信号”3种手性状态之间的可逆切换.并且,CD信号在切换的过程中,该体系展现出不同的颜色,说明CD信号的状态可通过外观直接读取,这一性质为

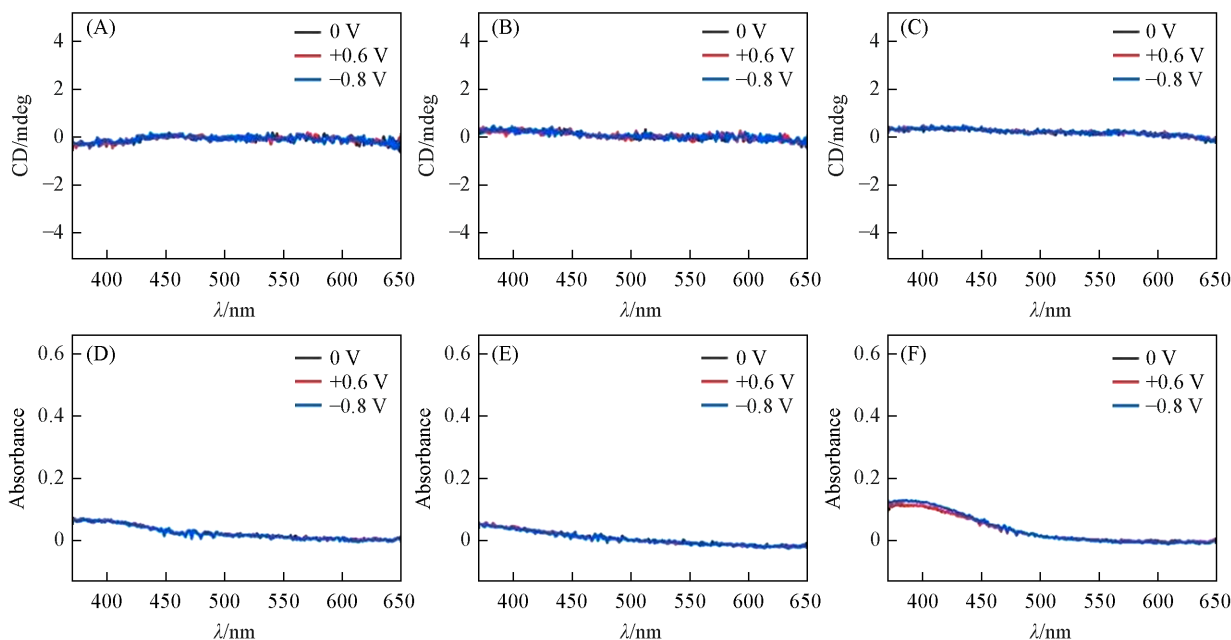
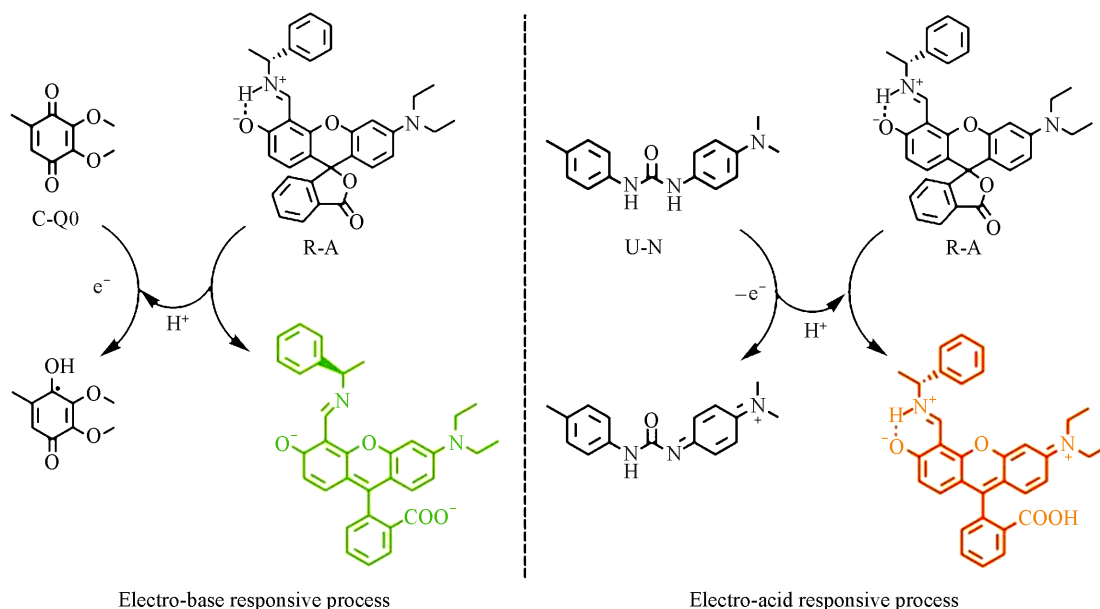


Fig. 5 CD spectra of 2.0×10^{-4} mol/L R-A(A), 1.0×10^{-3} mol/L U-N(B) and 1.0×10^{-3} mol/L C-Q0(C) with 1.0×10^{-1} mol/L TBAPF₆ in CH₃CN and UV-Vis absorption spectra of 2.0×10^{-4} mol/L R-A(D), 1.0×10^{-3} mol/L U-N(E) and 1.0×10^{-3} mol/L C-Q0(F) with 1.0×10^{-1} mol/L TBAPF₆ in CH₃CN under various voltages

该体系在传感显示领域的应用奠定了基础.

2.4 电响应多重手性光学开关的机理分析

所建立体系的手性光学开关机理如 Scheme 3 所示. 当 U-N, C-Q0 与 R-A 三者混合后, 体系初始表现为中性, R-A 为关环状态, 无可见光波段内的 CD 吸收; 当对体系施加 U-N 的氧化电压时, U-N 作为“电致酸”发生电化学氧化反应释放出质子, 使得体系表现为酸性, 诱导 R-A 得到质子发生酸式开环, 在可见光波段内产生特征的酸响应 CD 吸收, 即正 CD 信号; 而当施加 C-Q0 的还原电压时, C-Q0 作为“电致碱”发生电化学还原反应, 产生 C-Q0 的阴离子自由基形式, 使得体系表现为碱性, 诱导 R-A 失去质子发生碱式开环, 在可见光波段内产生特征的碱响应 CD 吸收, 即负 CD 信号; 之后, 对体系施加合适的反向电压, U-N/C-Q0 被还原/氧化为初始状态, 体系恢复至中性状态, 诱导 R-A 恢复至关环状态, 可见光波段再次表现为无 CD 吸收.



Scheme 3 Diagram of the multiple chiroptical switching mechanism based on the R-A

3 结 论

基于质子耦合电子转移机制, 通过将酸/碱响应手性光学开关 R-A、电致酸(U-N)以及电致碱(C-Q0)三者之间高效结合, 制备了电响应的多重手性开关体系. 在合适的电压下, 此体系在可见光波段内的手性光学性质(圆二色吸收)会发生可逆切换: 初始状态无 CD 信号, 较大正电压下产生正 CD 信号(峰位 532 nm)以及较大负电压下产生负 CD 信号(峰位 516 nm), 在较小的反向电压下能可逆恢复至初始状态. 这一方案为构筑新型电响应多重手性光学开关提供了新思路, 有助于促进此类智能材料的发展与应用.

参 考 文 献

- [1] Yang X. F., Zhou M. H., Wang Y. F., Duan P. F., *Adv. Mater.*, **2020**, 32(24), 2000820
- [2] Wang C. C., Liu L., Wang J. Y., Yan Y., *J. Am. Chem. Soc.*, **2022**, 144(43), 19714—19718
- [3] Zhang X. F., Hassan F., Bisoyi H. K., Wang H., Zhou Z. Y., Li Q., *Mater. Chem. Front.*, **2022**, 6(24), 3698—3705
- [4] Yang G. J., Yu Y., Yang B. G., Lu T., Cai Y. R., Yin H., Zhang H. Q., Zhang N. N., Li L., Zhang Y. M., Zhang S. X. A., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, 60(4), 2018—2023
- [5] Li M. Q., Chen L. J., Cai Y. S., Luo Q. F., Li W. L., Yang H. B., Tian H., Zhu W. H., *Chem.*, **2019**, 5(3), 634—648
- [6] Li J. J., Cui Y. H., Lu Y. L., Zhang Y. F., Zhang K. H., Gu C. A., Wang K. F., Liang Y. J., Liu C. S., *Nat. Commun.*, **2023**, 14(1), 5030
- [7] Liu G. F., Humphrey M. G., Zhang C., Zhao Y. L., *Chem. Soc. Rev.*, **2023**, 52(13), 4443—4487

- [8] Tokunaga S., Itoh Y., Tanaka H., Araoka F., Aida T., *J. Am. Chem. Soc.*, **2018**, *140*(35), 10946—10949
- [9] Saleh N., Vanthuyne N., Bonvoisin J., Autschbach J., Srebro-Hooper M., Crassous J., *Chirality*, **2018**, *30*(5), 592—601
- [10] Eguchi N., Goto H., *J. Polym. Sci.*, **2020**, *58*(13), 1881—1888
- [11] Goto H., Yashima E., *J. Am. Chem. Soc.*, **2002**, *124*(27), 7943—7949
- [12] Deng J., Song N., Zhou Q., Su Z., *Org. Lett.*, **2007**, *9*(26), 5393—5396
- [13] Yang X., Seo S., Park C., Kim E., *Macromolecules*, **2014**, *47*(20), 7043—7051
- [14] Gaedke M., Witte F., Anhäuser J., Hupatz H., Schröder H. V., Valkonen A., Rissanen K., Lützen A., Paulus B., Schalley C. A., *Chem. Sci.*, **2019**, *10*(43), 10003—10009
- [15] Xiao C., Wu W. H., Liang W. T., Zhou D. Y., Kanagaraj K., Cheng G., Su D., Zhong Z. H., Chruma J. J., Yang C., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59*(21), 8094—8098
- [16] Song L., You L. Y., Chen K., Lee W. J., Mei J. G., *Adv. Mater.*, **2024**, *36*(3), 2307057
- [17] Bao S. T., Louie S., Jiang H. Y., Jiang Q. F., Sun S. T., Steigerwald M. L., Nuckolls C., Jin Z. X., *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, *146*(1), 51—56
- [18] Formen J. S. S. K., Wolf C., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*(52), 27031—27038
- [19] Gong Y. R., Chen C. B., Mao Q. N., Ma D. L., Liu G. Q., Yang G. J., Zhang Y. M., *Chem. J. Chinese Universities*, **2021**, *42*(12), 3651—3656(龚怡然, 陈昌兵, 毛倩楠, 马栋良, 刘国权, 杨国坚, 张宇模. 高等学校化学学报, **2021**, *42*(12), 3651—3656)
- [20] Yang G. J., Yao Z. Q., Yang X. F., Xie Y. G., Duan P. F., Zhang Y. M., Zhang S. X. A., *Adv. Sci.*, **2022**, *9*(26), 2202636
- [21] Zhang Y. M., Li W., Wang X. J., Yang B., Li M. J., Zhang S. X. A., *Chem. Commun.*, **2014**, *50*(12), 1420—1422
- [22] Wang X. J., Li W., Li W. R., Gu C., Zheng H. Z., Wang Y. Y., Zhang Y. M., Li M. J., Zhang S. X. A., *Chem. Commun.*, **2017**, *53*(81), 11209—11212
- [23] Yang G. J., Yang B. G., Mu W. J., Ge Y. H., Cai Y. R., Yao Z. Q., Ma Z. Y., Zhang Y. M., Zhang S. X. A., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2020**, *12*(24), 27453—27460
- [24] Huang Z. K., Wang T. T., Chen Y. J., Huang S. Y., Wang J. J., Guo J. N., Yu Y., *Chem. J. Chinese Universities*, **2023**, *44*(11), 20230226(黄志康, 王彤彤, 陈雨静, 黄世玉, 王佳佳, 郭君年, 于洋. 高等学校化学学报, **2023**, *44*(11), 20230226)
- [25] Yang G. J., Zhang Y. M., Cai Y., Yang B. G., Gu C., Zhang S. X. A., *Chem. Soc. Rev.*, **2020**, *49*(23), 8687—8720
- [26] Zhang W. R., Wang X. J., Wang Y. Y., Yang G. J., Gu C., Zheng W. X., Zhang Y. M., Li M. J., Zhang S. X. A., *Nat. Commun.*, **2019**, *10*, 1559

(Ed.: L, W, K)