

# 葫芦[n]脲主客体作用介导光可移除 保护基团分子的光解反应

刘冲, 刘思敏

(武汉科技大学化学与化工学院, 武汉 430081)

**摘要** 设计合成了具有光可移除保护基团(PPG)特性的芳香族吖啶衍生物;通过核磁共振波谱、紫外-可见光谱和荧光光谱等手段,研究了葫芦[n]脲(CB[n],  $n=7, 8, 10$ )主体与该客体分子的主客体识别过程及主客体作用对其水相光解反应的影响.研究发现, CB[7]与客体分子形成了1:1的主客体包合物, CB[8]与客体分子形成了1:1和1:2两种结合模式的主客体包合物,而CB[10]与客体分子形成了1:2的主客体包合物.进一步的研究表明, CB[7]的存在对客体的光解反应有一定的抑制作用,而CB[8]存在下客体的光解速率得到了明显提升.研究结果揭示了CB[n]空腔尺寸的微小变化对客体分子光解反应的不同影响,为进一步设计CB[n]作为纳米反应器介导PPG分子水相光解反应的超分子体系提供了新思路.

**关键词** 光可移除保护基团;光解反应;主客体作用;葫芦[n]脲;纳米反应器

中图分类号 O625.1 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20250033

## Photolysis of Photoremovable Protecting Group Molecule Mediated by the Host-guest Interaction of Cucurbit[n]uril

LIU Chong, LIU Simin\*

(School of Chemistry and Chemical Engineering,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract** An aromatic acridine derivative with photoremovable protecting group(PPG) properties was designed and synthesized. The host-guest recognition process between this guest molecule and cucurbit[n]uril(CB[n],  $n=7, 8, 10$ ) was investigated, along with the effects of host-guest interaction on the photolysis of the guest in aqueous-phase using nuclear magnetic resonance(NMR), ultraviolet visible(UV-Vis) and fluorescence spectroscopies. The results showed that CB[7] formed a 1:1 host-guest inclusion complex, while CB[8] formed both 1:1 and 1:2 complexes with the guest. Similarly, CB[10] exhibited a 1:2 binding mode. Furthermore, CB[7] was found to inhibit the photolysis, whereas CB[8] significantly enhanced the photolysis rate of the guest. This study highlights how subtle variations in CB[n] cavity size influence the photolysis reaction, offering insights into the design of CB[n]-based nanoreactor-mediated supramolecular systems for aqueous-phase photolysis of PPG molecules.

**Keywords** Photoremovable protecting group; Photolysis reaction; Host-guest interaction; Cucurbit[n]uril; Nanoreactor

光可移除保护基(PPG)分子是一类重要的光响应分子,由离去基团和光可移除保护基团两部分组成<sup>[1]</sup>.其受光激发后能够发生分子内化学键剪切断裂,并有效释放被保护的有机分子或基团,具有很

收稿日期: 2025-02-04. 网络首发日期: 2025-02-26.

联系人简介: 刘思敏, 男, 博士, 特聘教授, 主要从事有机合成、超分子主客体化学、超分子催化和智能超分子聚合材料等方面的研究. E-mail: liusimin@wust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 21871216)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.21871216).

高的时空精度,在有机合成、生物医学和荧光活化等领域具有重要应用潜力<sup>[2-5]</sup>.光可移除保护基分子的光解反应机理包括常见的离子型反应以及部分自由基反应<sup>[6]</sup>.在离子型反应机理中化学键发生异裂,反应中间态和活性中间体的不稳定常常导致反应的复杂性和产物的多样性.大环分子具有闭合的环状分子结构,内部存在的一定大小和形状的空腔可容纳客体分子<sup>[7]</sup>.许多具有纳米尺寸的大环主体分子,如冠醚、环糊精、杯芳烃以及柱芳烃等分子容器已被开发并用作催化剂或纳米反应器<sup>[8-11]</sup>,通过在分子层面模拟天然酶的活性中心和微环境等特点从而达到天然酶的催化效果<sup>[12-14]</sup>.葫芦[n]脲(CB[n])是一类以甘脲为结构单元、通过亚甲基桥联的大环化合物,其疏水性空腔和带电负性的端口羰基对阳离子具有极高的亲和性,而空腔大小不同的CB[n]也展现出不同的识别能力<sup>[15,16]</sup>.CB[n]主要从2个方面影响化学反应,包括疏水空腔的屏蔽效应或电负性的羰基端口来稳定反应中间体,以及限定空腔控制底物“反应预备”状态来调控化学反应<sup>[17-19]</sup>.然而,关于CB[n]对PPG分子光解反应的研究非常有限,已有的两例研究均是探索了单一的CB[n]对此类反应的影响<sup>[20,21]</sup>,系统性研究具有不同空腔CB[n]主体对PPG分子水相光解反应的影响尚未见报道.

本文设计合成了三甲基铵甲基作为光解离去基团的吡啶衍生物,考察了CB[n](n=7, 8, 10)类大环主体与该化合物的分子识别行为,并进一步研究了CB[n]的存在对该化合物光解反应活性的影响.

## 1 实验部分

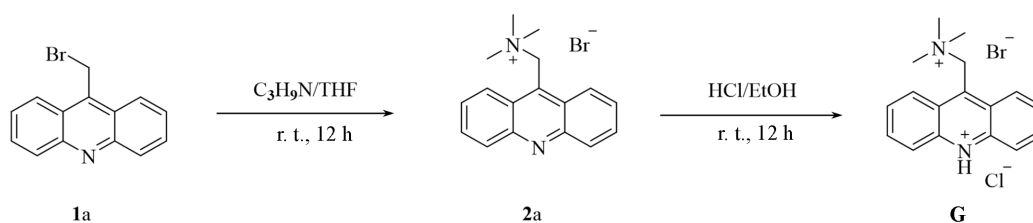
### 1.1 试剂与仪器

9-溴甲基吡啶(纯度98%),上海毕得医药科技股份有限公司;三甲胺溶液(2.0 mol/L in THF),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;浓盐酸(质量分数37%)、多聚甲醛、甲醇、甘脲、无水乙醇、二氯甲烷和石油醚,分析纯,国药集团化学试剂有限公司.

PerkinElmer LS-55型荧光分光光度计,美国珀金埃尔默股份有限公司;Q Exactive™型电喷雾质谱(ESI-MS),德国布鲁克科学仪器公司;Agilent 600 MHz型核磁共振波谱仪(NMR),美国安捷伦科技有限公司;Spectrofluorometer FS5型荧光光谱仪,英国爱丁堡公司;UV-3600型紫外-可见-近红外分光光度计,日本岛津公司;SCIENTZ-10N型冷冻干燥仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;KQ3200B型超声波清洗仪,昆山市超声仪器有限公司;RE-2000B型旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂.

### 1.2 实验过程

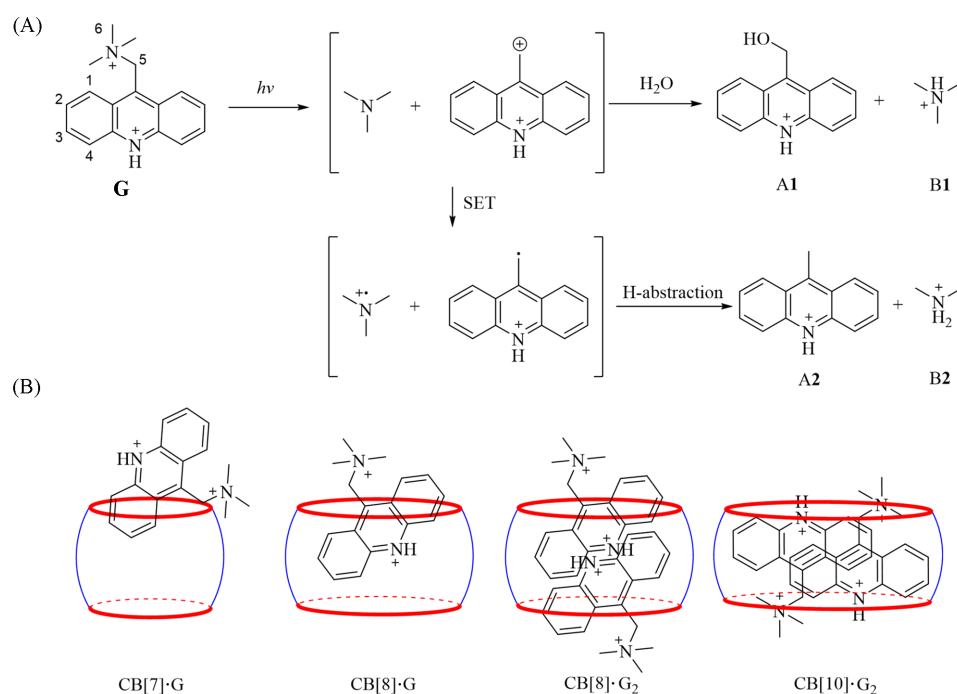
1.2.1 客体G的合成 参照文献[22]方法合成化合物G,合成路线见Scheme 1.



Scheme 1 Synthetic pathway of compound G

将272 mg(1.0 mmol)9-溴甲基吡啶(化合物1a)加入50 mL双口瓶中,注入30 mL无水四氢呋喃,搅拌溶解,再注入1.5 mL三甲胺溶液,回流反应12 h.待反应结束后,有黄色固体析出,离心,固体用四氢呋喃少量多次超声洗涤,经真空干燥,得到黄色固体产物即9-[(三甲基铵基)甲基]吡啶(化合物2a).将331 mg化合物2a加入50 mL烧瓶中,注入30 mL无水乙醇,搅拌溶解,再注入5 mL 12 mol/L的浓盐酸,回流反应12 h.待反应结束后,经旋转蒸发除去溶剂,再加入适量乙醇重复旋转蒸发至固体的水溶液pH接近中性,最终得到348 mg黄色固体化合物G,产率94.6%.核磁共振氢谱和碳谱见本文支持信息图S1和S2. <sup>1</sup>H NMR(D<sub>2</sub>O, 600 MHz), δ: 8.67(d, 2H), 8.35(d, 2H), 8.20(m, 2H), 8.00(m, 2H), 5.83(s, 2H), 3.22(s, 9H); <sup>13</sup>C NMR(D<sub>2</sub>O, 151 MHz), δ: 145.70, 133.07, 128.33, 127.77, 127.09, 126.39, 58.05, 53.63.

1.2.2 光解产物 A1 和 A2 的分离 化合物 G 在水相中的光解反应如 Scheme 2(A) 所示<sup>[23]</sup>. 将 150 mg 样品 G 溶解于 200 mL 水中配制成 2.0 mmol/L 的溶液, 经氮气鼓泡除氧后, 置于全波长的氙灯下照射 3 h. 反应后的溶液用碳酸氢钠调节至 pH 稍大于 7, 得到部分沉淀; 将沉淀用水洗涤后通过柱层析方法提纯, 用石油醚与二氯甲烷(体积比为 5:1, 1:1 和 1:10) 作为洗脱剂, 梯度过柱得到 9-羟甲基吡啶和 9-甲基吡啶. 将 2 种化合物通过滴加浓盐酸质子化并干燥, 最终得到 20 mg 化合物 A1 和 15 mg 光解产物 A2 (核磁共振氢谱见本文支持信息图 S3 和 S4)<sup>[24,25]</sup>. 化合物 A1: <sup>1</sup>H NMR(D<sub>2</sub>O, 600 MHz),  $\delta$ : 8.51(d,  $J=9.4$  Hz, 2H), 7.83(d,  $J=8.9$  Hz, 2H), 7.76(m, 2H), 7.43(m, 2H), 7.12(s, 1H), 4.86(s, 2H); 化合物 A2: <sup>1</sup>H NMR(D<sub>2</sub>O, 600 MHz),  $\delta$ : 8.47(d,  $J=8.8$  Hz, 2H), 8.09(s, 2H), 8.03(d,  $J=8.7$  Hz, 2H), 7.77(t,  $J=7.8$  Hz, 2H), 3.22(s, 3H).



Scheme 2 Photolysis of G in the aqueous phase(A) and plausible binding modes of G with CB[n](B)

1.2.3 CB[n] 的制备 参照文献[26]方法合成化合物 CB[7], CB[8] 和 CB[10].

1.2.4 液相测试样品的制备 客体分子与主体 CB[n] 识别样品的制备: (1) 称取客体固体样品, 加入重水溶解, 得到所需浓度的核磁共振样品; (2) 取一部分配制好的客体核磁共振样品, 分别加入一定量的 CB[7], CB[8] 和 CB[10] 超声溶解, 得到不同主体浓度的主客体混合核磁共振样品.

紫外和荧光样品的制备方法与核磁共振样品相同, 溶剂为蒸馏水. 用于光照的样品, 在样品配制完成后通氮气鼓泡 30 min 并密封.

## 2 结果与讨论

### 2.1 客体与 CB[n] 主体的分子识别

图 1 为客体 G 分别与 CB[7], CB[8] 和 CB[10] 识别的核磁共振氢谱图. 由图 1 中谱线 b 可知, 当 CB[7] 的浓度为 2.0 mmol/L 时, 自由客体的信号发生偏移, CB[7] 与客体 G 的结合在核磁时间尺度上表现为快交换. 原属于客体 G 的芳香区域(H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>) 的化学位移向高场移动( $\Delta\delta=-0.23, -0.34, -0.36$ ), 证明客体 G 的单侧苯环区域进入到 CB[7] 的空腔内. 吡啶环上的质子信号 H<sub>4</sub> 和侧链部分阳离子基团的质子信号 H<sub>5</sub> 和 H<sub>6</sub> 向低场移动( $\Delta\delta=0.15, 0.35, 0.09$ ), 表明客体的 4 号位和亚甲基靠近 CB[7] 的羰基端口. 通过客体 G 在 369 nm 处的吸光度变化绘制的 Job's Plot 图以及客体 G 和 CB[7] 的等温滴定量热实验结果均表明 G 与 CB[7] 的化学计量比为 1:1 (见本文支持信息图 S5 和 S7).

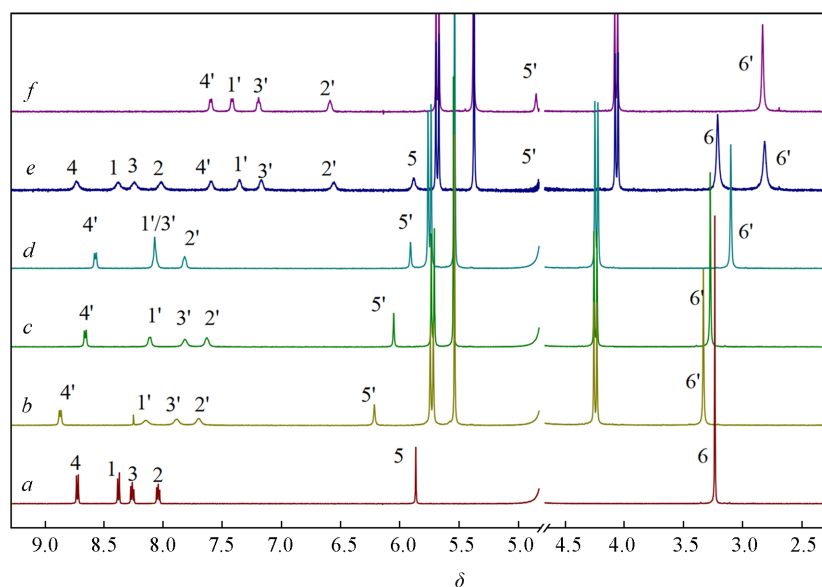


Fig. 1  $^1\text{H}$  NMR spectra of  $\text{G}(\text{D}_2\text{O}, 600 \text{ MHz}, 298 \text{ K}, 2.0 \text{ mmol/L})$  with  $0(a)$ ,  $2.0(b)$  mmol/L of  $\text{CB}[7]$ ,  $1.0(c)$ ,  $2.0(d)$  mmol/L of  $\text{CB}[8]$  and  $0.5(e)$ ,  $1.0(f)$  mmol/L of  $\text{CB}[10]$

由图1中谱线  $c$  和  $d$  可知,  $\text{CB}[8]$  与客体  $\text{G}$  在核磁时间尺度上表现为快交换. 当  $\text{CB}[8]$  的浓度为  $1.0 \text{ mmol/L}$  时, 自由客体的信号发生偏移, 属于客体  $\text{G}$  的芳香区域 ( $\text{H}_1, \text{H}_2, \text{H}_3$  和  $\text{H}_4$ ) 的化学位移向高场轻微移动 ( $\Delta\delta = -0.08, -0.26, -0.44, -0.40$ ), 证明客体  $\text{G}$  的单侧苯环区域完全进入到  $\text{CB}[8]$  的空腔内. 吡啶侧链部分的质子信号  $\text{H}_5$  和  $\text{H}_6$  向低场轻微移动 ( $\Delta\delta = 0.18, 0.04$ ), 表明客体  $\text{G}$  的侧链部分位于  $\text{CB}[8]$  的羰基端口处. 当  $\text{CB}[8]$  的浓度为  $2.0 \text{ mmol/L}$  时, 客体  $\text{G}$  的芳香区域 ( $\text{H}_1, \text{H}_2, \text{H}_3$  和  $\text{H}_4$ ) 的化学位移也向高场轻微移动 ( $\Delta\delta = -0.15, -0.30, -0.19, -0.22$ ), 吡啶侧链部分的质子信号  $\text{H}_5$  向低场轻微移动 ( $\Delta\delta = 0.04$ ), 而  $\text{H}_6$  向高场轻微移动 ( $\Delta\delta = -0.14$ ). 其原因是因为  $\text{CB}[8]$  的空腔较大,  $\text{CB}[8]$  与客体  $\text{G}$  的主客体结合模式因主客体相对浓度的变化而变化. 通过化合物  $\text{G}$  在  $369 \text{ nm}$  处的吸光度变化绘制的 Job's Plot 图验证了  $\text{CB}[8]$  与  $\text{G}$  的最佳化学计量比为  $1:1$  (见本文支持信息图 S6).

由图1中谱线  $e$  和  $f$  可知, 当  $\text{CB}[10]$  的浓度为  $0.5 \text{ mmol/L}$  时, 可观察到自由和包合的客体分子的信号, 表明客体  $\text{G}$  与  $\text{CB}[10]$  的结合在核磁时间尺度上为慢交换过程. 当  $\text{CB}[10]$  的浓度为  $1.0 \text{ mmol/L}$  时, 自由客体的质子信号峰全部消失. 同时,  $\text{G}$  的质子信号峰  $\text{H}_1 \sim \text{H}_5$  均向高场有较大的移动 ( $\Delta\delta = -1.12, -0.96, -1.06, -1.45, -1.02$ ), 侧链季铵盐部分的质子信号峰  $\text{H}_6$  向高场移动的幅度相对较小 ( $\Delta\delta = -0.41$ ), 表明整个客体分子进入了  $\text{CB}[10]$  的空腔内. 对谱线  $f$  进行积分分析 (见本文支持信息图 S8), 可知主客体的结合比应为  $1:2$ . 因为侧链上的静电排斥作用, 2个  $\text{G}$  分子在  $\text{CB}[10]$  的空腔内可能呈现头对尾的反向平行的排列方式. 客体  $\text{G}$  与主体分子的结合模式如 Scheme 2(B) 所示.

## 2.2 $\text{CB}[n]$ 存在下 $\text{G}$ 的光物理性质

基于以上结果, 进一步考察了  $\text{CB}[n]$  对客体分子光物理性质的影响. 实验结果表明, 随着  $\text{CB}[7]$  浓度的增加, 客体的紫外-可见吸收强度稍有增强<sup>[27]</sup>; 同样, 随着  $\text{CB}[8]$  浓度的增加, 溶液的紫外吸收强度也逐渐增强, 最大吸收峰从  $365 \text{ nm}$  红移至  $369 \text{ nm}$ ; 随着  $\text{CB}[10]$  浓度的增加, 溶液的紫外吸收强度逐渐减弱 (见本文支持信息图 S9~S11).

客体分子的浓度依赖荧光光谱实验结果 (图2) 表明, 原  $430 \text{ nm}$  处归属于单体荧光发射的强度随着浓度的增加而不断降低, 新峰的强度也随着浓度的增加而不断降低并最终红移至  $480 \text{ nm}$  处, 表明该客体分子可形成激基缔合物 (见本文支持信息图 S12 和图 S13)<sup>[28]</sup>. 随着  $\text{CB}[7]$  浓度的增加,  $430 \text{ nm}$  处的荧光发射强度逐渐减弱,  $480 \text{ nm}$  处的荧光发射强度逐渐增强.  $\text{CB}[8]$  的加入引起的客体荧光发射的变化与  $\text{CB}[7]$  类似. 随着  $\text{CB}[10]$  浓度的增加,  $430 \text{ nm}$  处属于单体荧光的发射峰强度逐渐下降,  $560 \text{ nm}$  附近新峰的荧光发射强度逐渐增强.

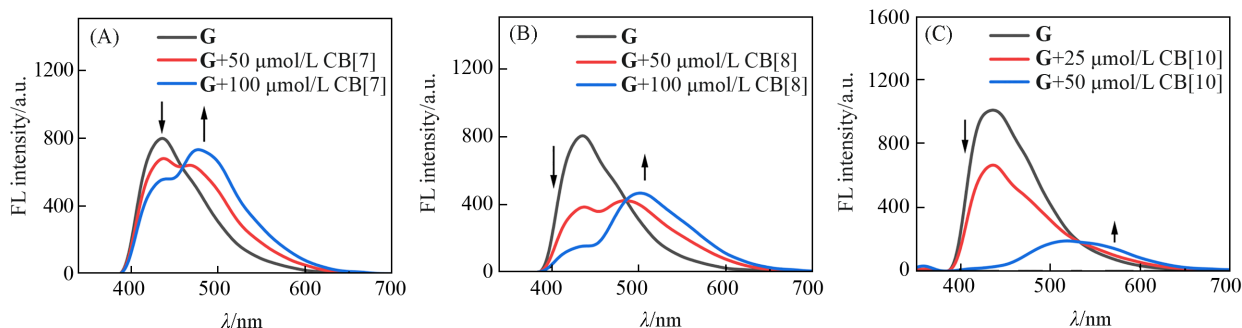


Fig. 2 FL spectra of G(100  $\mu\text{mol/L}$  in  $\text{H}_2\text{O}$ ) with different amount of CB[7](A), CB[8](B) and CB[10](C)

分别对客体及其包合物的水溶液(100  $\mu\text{mol/L}$ )进行了荧光寿命和量子产率检测. 实验结果表明, 客体的荧光寿命和量子产率分别为 10.68 ns 和 16.85%; CB[7]·G 的荧光寿命和量子产率分别为 15.65 ns 和 24.20%; CB[8]·G 的荧光寿命和量子产率分别为 12.59 ns 和 18.37%. 可见, 形成主客体包合物后, 客体的荧光量子产率略有增高. CB[7]·G 和 CB[8]·G 的荧光寿命和量子产率均高于客体 G, 且 CB[7]·G 的效果优于 CB[8]·G, 这可归因于 CB[*n*]的空腔限制了客体 G 的分子运动.

### 2.3 CB[*n*]对 G 光解反应的影响

在证实了 CB[7], CB[8]以及 CB[10]与客体 G 的结合模式具有显著差异后, 进一步研究了 CB[*n*]对 G 分子光解反应的影响, 并通过  $^1\text{H}$  NMR 进行了监测(见本文支持信息图 S14~S18). 如图 3 所示, 谱线 *b* 为自由客体 G 在氙灯下照射不同时间后的核磁共振氢谱图. 对比图 3 中谱线 *a* 可知, 单独的客体 G 在光照 100 min 后能够得到预期的光解产物 A1, A2, 盐酸三甲胺 B1 及盐酸二甲胺 B2. 随着时间的延长, 光解产物的质子氢信号峰逐渐清晰, 对图谱进行积分发现, 客体 G 的转换率达到了 88.3% (见本文支持信息图 S14). 图 3 谱线 *c* 为 G 与相同浓度的 CB[7] 在氙灯下照射 480 min 后的核磁共振氢谱图. 可以看出, 光照 480 min 后大部分客体被消耗, 所得到光解产物与无 CB[7] 存在下得到的光解产物相同. 同时, 反应产物 B1 的化学位移向低场移动, 说明化合物 B1 与 CB[7] 之间存在识别过程(见本文支持信息图 S15). 该水解反应速率在 CB[7] 存在下被明显抑制, 这可能是由于 CB[7] 与 G 的高亲和能力和特殊的结合位点导致光解反应不容易生成碳正离子, 从而抑制了光解反应的发生. 对光照 480 min 后的核磁共振谱图进行积分, 发现 G 的转换率达到 80.7%.

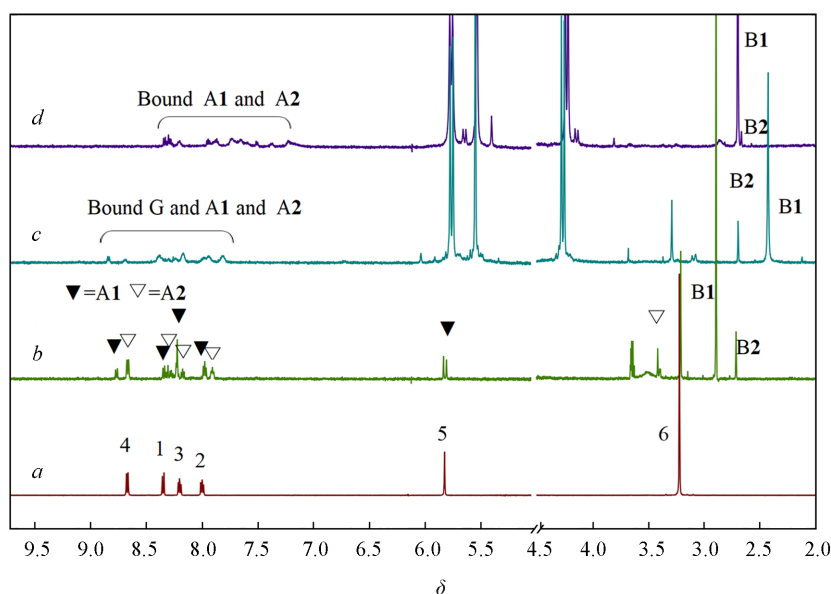


Fig. 3  $^1\text{H}$  NMR spectra( $\text{D}_2\text{O}$ , 600 MHz, 298 K) of G solution(2.0 mmol/L) with various irradiation time  
a. free G, 0 min; b. free G, 100 min; c. G+CB[7](2.0 mmol/L), 480 min; d. G+CB[8](2.0 mmol/L), 30 min.

图3谱线 *d* 为 **G** 与相同浓度的 CB[8] 在氙灯下照射 30 min 后的核磁共振氢谱图. 相比而言, 客体 **G** 在 CB[8] 存在下光照后迅速发生反应, 反应速率得到明显提升(见本文支持信息图 S16), 这可能是因为 CB[8] 的端口羰基可以稳定光解反应的中间体碳正离子, 从而加速了该光解反应<sup>[20,21]</sup>. 对光照 30 min 后的核磁共振谱图进行积分发现, 在 CB[8] 存在下客体 **G** 的光解转换率达到了 94.0%. 通过对光照后的样品进行竞争实验并冷干后测定核磁共振氢谱, 验证了客体 **G** 在 CB[8] 存在下光照也生成了预期的光解产物(见本文支持信息图 S17). 有无 CB[*n*] 存在下的光解产物 B1 与 B2 和原料的相对分布如本文支持信息表 S2 所示, CB[8] 存在下的光解产物 B1 与 B2 的相对含量不同于自由客体和 CB[7] 的光解, 这预示着 CB[*n*] 的存在可能对该光解的两种反应路径有影响. 根据反应机理, B2 是光反应过程中中间体发生氢原子重排的产物, CB[8] 存在下产物 B2 的相对含量更低, 这可能是因为 CB[8] 存在下反应速率更快, 反应时间更短, 因此反应途径 2 的产物 B2 更少. 而 CB[7] 抑制了该反应的反应速率, 最终的产物分布与自由客体在光照下的产物分布大致相同. 在 CB[10] 存在下客体 **G** 的光反应产生了大量沉淀, 从光照 60 min 后的核磁共振谱图中可以观察到光解产物 B1 和 B2(见本文支持信息图 S18), 证明了 CB[10] 存在下客体 **G** 的光解反应具有与自由客体相似的反应途径. 但由于生成的光解产物与 CB[10] 形成沉淀, 导致无法定量分析 CB[10] 对该光解反应的具体影响效果.

基于对核磁共振氢谱的研究, 总结了客体分子 **G** 在有无 CB[7]/CB[8] 主体分子存在下进行光解反应转化的原料消耗拟合曲线以及转化一半所需要的时间. 如图 4 和表 S1(见本文支持信息)所示, 在 CB[7] 主体分子存在下, 半转化时间显著延长, 而在 CB[8] 主体分子存在下, 半转化时间极大缩短, 证明 CB[7]/CB[8] 主体分子对 **G** 光解反应的影响效果是截然不同的.

利用紫外和荧光光谱检测了光解反应的进行(见本文支持信息图 S19~S24). 将自由客体 **G** 及其在 2 mmol/L CB[7] 或 CB[8] 存在下光照后的溶液稀释成 100 μmol/L 后, 测定其紫外吸收光谱和荧光发射光谱. 实验结果表明, 在有无 CB[*n*] 的 **G** 的光解反应中, 随着时间的延长, 最大吸收峰强度逐渐降低. 荧光发射谱和紫外可见吸收光谱的变化趋势类似, 约 425 nm 处归属于客体 **G** 的荧光发射强度随着光反应中客体 **G** 的消耗而逐渐降低. 由化合物 A2 与 CB[7] 的荧光滴定谱图(见本文支持信息图 S25)可知, 490 nm 附近的新峰可归属为光解产物 A2 的荧光发射峰, 而客体 A1 在相同激发波长条件下的荧光发射光谱线较为平滑(见本文支持信息图 S26), 表明 490 nm 附近的荧光发射强度逐渐增加是因为 A2 产物的富集所致.

### 3 结 论

设计合成了以三甲基铵甲基作为光解离去基团的吡啶衍生物 **G**, 并研究了大环主体 CB[7], CB[8] 和 CB[10] 对该化合物水相光解反应的影响. 相较于自由客体 **G**, CB[7] 和 CB[8] 与 **G** 的包结提升了其荧光量子产率. 在水相中, 归因于 CB[7] 与客体分子的强亲和性及结合位点, 抑制了客体 **G** 发生光解反应中碳正阳离子的生成, 导致该光解反应的速率较低, 起到了保护该 PPG 分子的效果; 而 CB[8] 的存在显著加速了该光解反应, 归因于 CB[8] 的大空腔更有利于稳定碳正阳离子中间体, 导致该光解反应的加速. 本文系统研究了不同空腔大小的 CB[*n*] 主体介导季铵盐芳香族化合物的光解反应, 揭示了主体空腔大小不同导致的主客体结合强度、结合模式及结合位点的不同, 对此类光解反应的影响也不尽相同. 研究结果为进一步拓展了 CB[*n*] 作为纳米反应器在超分子催化领域的应用提供了参考.

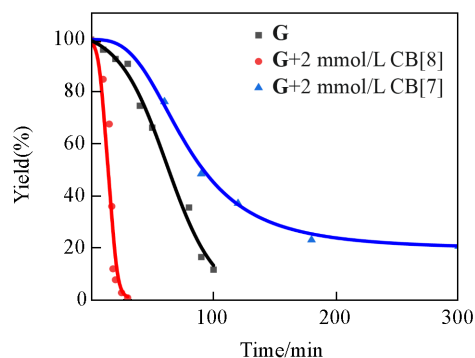


Fig. 4 Photoreaction fitting curve of **G** solution (2.0 mmol/L)

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20250033>.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Zhang T. L., Chen G., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, 45(5), 20240056(张天龙, 陈光. 高等学校化学学报, **2024**, 45(5), 20240056)
- [ 2 ] Lu D. H., Yang S., Yu Q. Y., Zhu T., Ji L., Wang C., Deng T. H., Liu S. J., Lv W., Zhao Q., *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, 518, 216117
- [ 3 ] Klan P., Solomek T., Bochet C. G., Blanc A., Givens R., Rubina M., Popik V., Kostikov A., Wirz J., *Chem. Rev.*, **2013**, 113(1), 119—191
- [ 4 ] Vorobev A. Y., Moskalensky A. E., *Comput. Struct. Biotec.*, **2020**, 18, 27—34
- [ 5 ] Wei T. W., Jiang L., Chen Y. H., Chen X. Q., *Acta Chim. Sinica*, **2021**, 79(1), 58—70(魏廷文, 江龙, 陈亚辉, 陈小强. 化学学报, **2021**, 79(1), 58—70)
- [ 6 ] Chen D., Liu J. C., Zhang X. Y., Jiang H. Z., Li J. H., *Chinese J. Org. Chem.*, **2019**, 39(12), 3353—3362(陈丹, 刘剑沉, 张馨元, 蒋合众, 李加洪. 有机化学, **2019**, 39(12), 3353—3362)
- [ 7 ] Jiang J. X., Wang Y. C., Li Z. Y., Fan X. L., Shi B. B., *J. Northwest Normal Univ. Nat. Sci.*, **2024**, 60(3), 1—4(蒋竞雄, 王玉纯, 李镇宇, 范喜亮, 史冰冰. 西北师范大学学报(自然科学版), **2024**, 60(3), 1—4)
- [ 8 ] Ostrowska M., Fritsky I. O., Gumienna-Kontecka E., Pavlishchuk A. V., *Coord. Chem. Rev.*, **2016**, 327, 304—332
- [ 9 ] Liu Z. X., Liu Y., *Chem. Soc. Rev.*, **2022**, 51(11), 4786—4827
- [ 10 ] Sachdeva G., Vaya D., Srivastava C. M., Kumar A., Rawat V., Singh M., Verma M., Rawat P., Rao G. K., *Coord. Chem. Rev.*, **2022**, 472, 214791
- [ 11 ] Bleus S., Dehaen W., *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, 509, 215762
- [ 12 ] Sha M., Xu W. Q., Wu Z. C., Gu W. L., Zhu C. Z., *Chem. J. Chinese Universities.*, **2022**, 43(5), 20220077(沙蒙, 许维庆, 吴志超, 顾文玲, 朱成周. 高等学校化学学报, **2022**, 43(5), 20220077)
- [ 13 ] Li W. L., Head-Gordon T., *ACS Cent. Sci.*, **2021**, 7(1), 72—80
- [ 14 ] Barimah A. O., Tai S. M., Sun C. D., Ding T., Peng C. F., Mao M. X., Wang Z. P., Agyekum A. A., *Talanta*, **2025**, 285, 127369
- [ 15 ] Barrow S. J., Kaser S., Rowland M. J., del Barrio J., Scherman O. A., *Chem. Rev.*, **2015**, 115(22), 12320—12406
- [ 16 ] Yang X. R., Liu F. B., Zhao Z. Y., Liang F., Zhang H. J., Liu S. M., *Chin. Chem. Lett.*, **2018**, 29(11), 1560—1566
- [ 17 ] Gong W. J., Zhao Z. Y., Liu S. M., *Prog. Chem.*, **2016**, 28(12), 1732—1742
- [ 18 ] Tang B. H., Zhao J. T., Xu J. F., Zhang X., *Chem. Eur. J.*, **2020**, 26(67), 15446—15460
- [ 19 ] Hu X. C., Yang J. L., Gao F., Zhao Z. Y., Liu S. M., *Chin. Chem. Lett.*, **2025**, 36(3), 109967
- [ 20 ] Hu X. C., Liu F. B., Zhang X. Z., Zhao Z. Y., Liu S. M., *Chem. Sci.*, **2020**, 11(18), 4779—4785
- [ 21 ] Mei S., Qu Q., Tang X. C., Xu J. F., Zhang X., *Org. Lett.*, **2023**, 25(28), 5291—5296
- [ 22 ] Narikiyo H., Gon M., Tanaka K., Chujo Y., *Mater. Chem. Front.*, **2018**, 2(8), 1449—1455
- [ 23 ] Wang P. F., Devalankar D. A., Lu W. Y., *J. Org. Chem.*, **2016**, 81(15), 6195—6200
- [ 24 ] Chen W., Zhang Y., Yi H. B., Wang F. L., Chu X., Jiang J. H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(17), e202300162
- [ 25 ] Bian Z. L., Lv X. X., Li Y. L., Sun W. W., Liu J. K., Wu B., *Org. Biomol. Chem.*, **2020**, 18(40), 8141—8146
- [ 26 ] Yang X. R., Zhao Z. Y., Zhang X. Z., Liu S. M., *Sci. China: Chem.*, **2018**, 61(7), 787—791
- [ 27 ] Cong H., Li C. R., Xue S. F., Tao Z., Zhu Q. J., Wei G., *Org. Biomol. Chem.*, **2011**, 9(4), 1041—1046
- [ 28 ] Sharma V. K., Sahare P. D., Rastogi R. C., Ghoshal S. K., Mohan D., *Spectrochim. Acta A*, **2003**, 59(8), 1799—1804

(Ed.: L, V, K)