

•化学实验•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202210050

www.dxhx.pku.edu.cn

1,2-二咔唑基-4-溴苯的合成及长余辉性质表征

吕华星, 顾若冰, 倪骥腾, 韩春苗, 许辉*

黑龙江大学化学化工与材料学院, 功能无机材料化学教育部重点实验室, 哈尔滨 150080

摘要: 有机功能材料是有机化学重要的研究方向之一。将国际前沿的先进有机功能材料合成方法及其性质表征引入到基础有机化学实验, 有望进一步丰富教学内容, 促进本科教学与科研成果之间的衔接。基于此目的, 本项目选择有机长余辉材料这一国际前沿研究热点, 与芳香亲核取代反应实验教学相结合, 指导学生认识合成反应在构建有机功能材料中的关键作用, 进一步将知识体系延伸至现代波谱技术, 树立学生正确的科学观念。通过本项目, 形成“有机反应-分子结构-材料功能”为链条的系统教学, 培养学生的科学素养和综合创新能力。

关键词: 有机长余辉材料; 芳香亲核取代反应; 荧光光谱学; 科教融合

中图分类号: G64; O6

Synthesis of 1,2-Dicarbazoyl-4-Bromobenzene and Characterization of Long Afterglow Properties

Huaxing Lv, Ruobing Gu, Jiteng Ni, Chunmiao Han*, Hui Xu*

Key Laboratory of Functional Inorganic Material Chemistry Ministry of Education, School of Chemistry and Materials, Heilongjiang University, Harbin 150080, China.

Abstract: Organic functional materials have attracted significant research attention in organic chemistry. Introducing the synthesis and characterization of advanced organic functional materials into basic organic chemistry experiments can enrich the study content and promote the connection between teaching and academic achievements. Therefore, in this project, one of the research frontiers, *i.e.*, organic long-afterglow materials, were selected and combined with the laboratory teaching of nucleophilic aromatic substitution. This project can help students understand the key role of synthetic reactions in constructing organic functional materials. Furthermore, extending the knowledge system to modern spectroscopy technologies can help students understand correct scientific concepts. This experiment completes the systematic teaching of the “synthesis-molecular structure-photoelectric properties” knowledge chain, thereby developing students’ science literacy and continual innovatory capacity.

Key Words: Organic long-afterglow materials; Nucleophilic aromatic substitution; Fluorescence spectroscopy; Science and education integration

1 引言

2015年, 国务院发布了《关于深化高等学校创新创业教育改革的实施意见》, 强调“各高校要推动教师把国际前沿学术发展、最新研究成果和实践经验融入课堂教学, 注重培养学生的批判性和创造性思维, 激发创新创业灵感”。2018年, 教育部发布了《关于加快建设高水平本科教育全面提

收稿: 2022-10-20; 录用: 2022-12-20; 网络发表: 2023-01-31

*通讯作者, Emails: hanchunmiao@hlju.edu.cn (韩春苗); hxiu@hlju.edu.cn (许辉)

基金资助: 中国学位与研究生教育学会学位与研究生教育研究课题(2020MSA230); 黑龙江省高等教育教学改革项目(SJGY20200566, SJGY20200549); 国家级大学生创新创业训练项目(202210212018); 黑龙江省一流本科课程建设项目; 黑龙江省研究生课程思政课程建设项目

高人才培养能力的意见》，强调“高校要强化科教协同育人，将最新科研成果及时转化为教育教学内容，以高水平科学研究支持高质量本科人才培养，增强学生的创新精神和科研能力”。同年，教育部高等学校化学类专业教学指导委员会提出国家对化学类人才的需求呈现多样性特征，体现在类型、层次、特长等方面的差异。为了适应国家发展需要，化学类专业的实验课程应遵循“高阶性、创新性、挑战度”的标准，着力培养四类人才，即化学基础研究拔尖人才、创新应用型化学人才、交叉复合型化学人才和应用服务型化学人才^[1,2]。在这一大背景之下，本科化学实验与化学前沿知识的结合势在必行。

长余辉材料也称夜光材料，是一类在光源激发下发出可见光，并将获得的部分光能储存起来，在激发停止后仍然能够持续发光的光致发光材料。具有这种现象的材料可以将从太阳光、荧光灯、白炽灯等光源获得的能量贮存起来，在停止照射后缓慢发光，因而在指示、照明、安全、防伪、装饰等领域有广阔的应用。按化学结构，长余辉材料可以分为无机和有机两类。现在广泛使用的无机长余辉材料可分为硫化物、碱土铝酸盐、碱土硅酸盐等，具有稳定性强、余辉时间长等优点，但是存在加工性能差、发光性质调节困难等问题。与无机材料相比，有机长余辉材料的余辉时间较短，但具有发光效率高、结构易裁剪、性质易调控等优点。因此，有机长余辉材料受到了国内外的广泛关注，近年来取得了快速的发展，已经开发出小分子^[3]、主客体掺杂^[4]、聚合物^[5]等多种体系。Web of Science的数据显示“有机长余辉”相关研究的论文数量和质量均呈现逐年增长的趋势，并且入选了科睿唯安与中国科学院联合发布的2020年化学与材料科学领域重点热点前沿(如图1)。

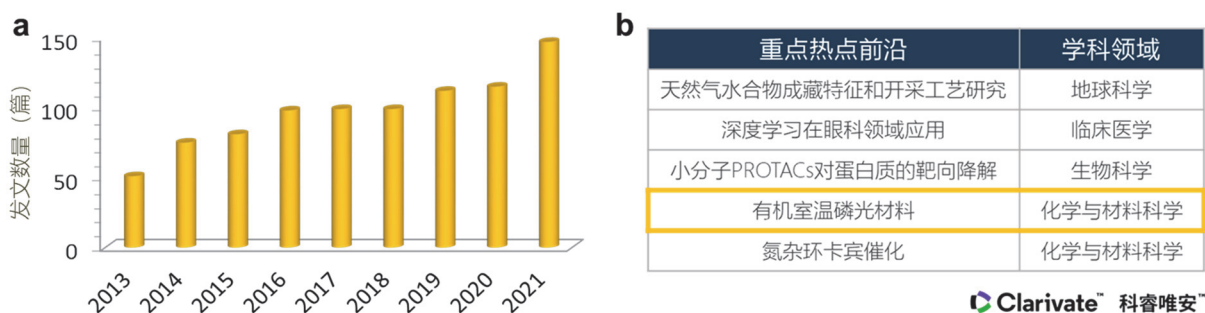


图1 (a) Web of Science收录有机长余辉领域年发文量变化趋势;
(b) 科睿唯安与中国科学院联合发布的2020年化学与材料科学领域重点热点前沿

芳香族亲核取代反应是亲核取代反应的一类，不仅在理论研究上具有重要意义，而且在有机合成上得到了广泛应用^[6,7]。我们将第三版^[8]与第四版^[9]《基础有机化学》教材进行了对比(如图2)，从硝基化合物的一类特征反应到芳环取代反应的重要一类，强化了对“取代基对芳烃取代反应的影响”的理解，普适性更强。同时调查了北方、华中、南方地区三所高校的有机化学实验教材(如图3)，均

《基础有机化学(第三版)》	《基础有机化学(第四版)》
第18章 含氮芳香化合物 芳香亲核取代反应	第16章 芳环上的取代反应
(一) 芳香硝基化合物 18.3.2 芳香亲核取代反应 (I) S_N2Ar 机理	16.12 芳香亲核取代反应 (一) 加成-消除机理 (S_N2Ar 机理)
(二) 芳香胺 18.9.2 重氮盐的水解 芳香亲核取代反应 (II) S_N1Ar 机理	16.13 芳香亲核取代反应 (二) 亲核加成-开环-关环机理 (ANRORC机理)
(三) 苯炔 18.15 芳香亲核取代反应 (III) 苯炔中间体机理	16.14 芳香亲核取代反应 (三) 间接芳香亲核取代反应 (VNS)

图2 《基础有机化学》第三版^[8]与第四版^[9]教材对比

无芳香亲核取代反应；又对本校图书馆的有机化学实验书籍进行实地考察调研(如图4)，仅有两本实验书籍包含芳香亲核取代反应，但年代较久，具有一定的局限性。

北方某高校		华中某高校		南方某高校	
乙酸正丁酯	正溴丁烷合成	正溴丁烷的制备	二苯乙醇酸的制备	制备苯甲酸乙酯	制备扁桃酸
咪喃甲醇和咪喃甲酸	2-甲基-2-己醇	溶解、重结晶、熔点测定	二苯乙二酮的合成	提取咖啡因	制备抗凝血素华法林
提取胡萝卜素	4-苯基-2-丁酮	提取咖啡因、茶多酚	4,4-二苯基-3-丁烯-2-酮的合成	制备二苯叉丙酮	L-苯基乳酸制备
蒸馏、重结晶等基本操作	1-苯基-4-萘基-1,3-丁二烯	乙酰二茂铁的合成、纯化及鉴定	烯胺不对称催化	苯甲醛的Cannizzaro反应	苹果酯A的制备
对甲基苯乙酮	1-苯基乙醇	三苯甲醇的制备	肉桂酸的合成	肉桂酸的制备	苹果酯A的格氏反应
提取咖啡因	二苯基乙二酮	制备苯甲酸乙酯	正己酸的合成	安息香的氧化与还原	4,4-二苯基-3-丁烯-2-酮的制备
肉桂酸	二苯基乙醇酸	水相Heck反应或Suzuki-Miyaura反应	7,7-二氯双环[4.1.0]庚烷的合成	制备乙酰二茂铁	制备止咳酮

图3 北方、华中、南方地区三所高校实验教材调研

  5.2.1. 活化芳香化合物的亲核取代 芳基（或烷基-）2,4-二硝基苯基硫醚 2,4-二硝基苯肼 α-氨基吡啶 β-萘酚 3-氰基吡啶（烟酸腈）		
与基础有机化学实验相关的书籍数	包含芳香亲电取代反应的书籍数	包含芳香亲核取代反应的书籍数
58 本	55 本	2 本（含教材1本）

图4 本校图书馆有机化学实验书籍调研

2 实验部分

2.1 实验目的

- (1) 熟悉芳香亲核取代反应的机理并了解长余辉机理；(基础版)
- (2) 掌握加热反应、抽滤、回流等基本实验操作；(基础版)
- (3) 学会应用核磁氢谱、解析化学结构；(基础版)
- (4) 熟悉荧光光谱仪测试原理，掌握发光光谱和寿命的测试方法；(进阶版)
- (5) 掌握正交实验的设计及实施；(高阶版)
- (6) 了解和体会有机功能材料的实际应用。(高阶版)

2.2 实验原理

- (1) 芳香亲核取代反应原理。

卤代芳香族亲核取代最重要的机理分为两步(如图5)：第一步亲核试剂进攻底物形成 δ -中间体，此过程一般较慢为决速步骤；第二步为C-X的断裂，离去基团X的离去，此步速度较快^[10]。与其他卤素相比，氟原子电负性最大，是良好的离去基团^[11]，氟苯的相对亲核取代反应速率达到3300。

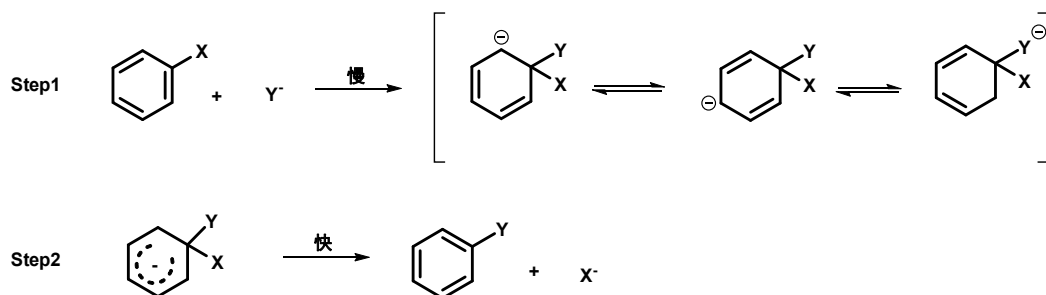


图5 卤代芳香族亲核取代反应机理图

本实验中,以1,2-二氟-4-溴苯作为卤代芳香烃,咔唑作为亲核试剂。在碱条件下,咔唑失去N—H活泼氢,形成氮负离子,随后进攻与氟相连的碳原子,先形成 δ -中间体,最后脱去离去基团氟离子,得到目标产物。反应方程式如图6所示。

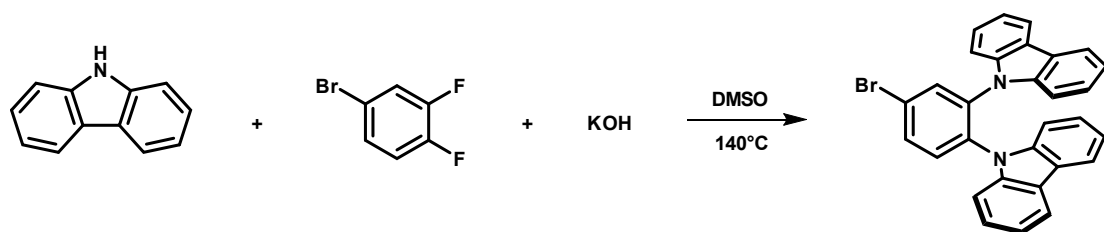
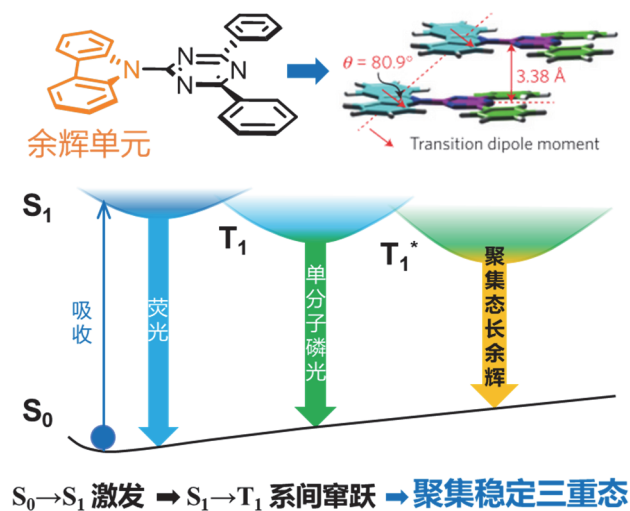


图6 本实验反应方程式

(2) 长余辉发光原理。

咔唑衍生物已经发展成为一类重要的有机长余辉材料。因其平面结构,咔唑衍生物容易形成H-聚集体,所以,其余辉行为一般遵循聚集诱导长余辉机理,即分子被激发后首先跃迁到最低单重态激发态 S_1 (吸收),然后要么退激发出荧光,要么通过系间窜跃转化为最低三重态激发态 T_1 ,进而发出单分子磷光。通过分子间聚集则可进一步稳定三重态,从而将磷光寿命显著延长至秒级,产生余辉现象(如图7)^[12]。

图7 咔唑类长余辉材料的聚集诱导长余辉机理^[12]

1 Å = 0.1 nm

2.3 试剂或材料

本实验所需试剂见表1。

表1 所用试剂名称、来源及其纯度

实验试剂	厂家	纯度
4-溴-1,2-二氟苯	九鼎化学	98%
唑啉	上海麦克林生化科技有限公司	98%
氢氧化钾	天津市风船化学试剂科技有限公司	AR
二甲基亚砜	天津市奥普升化工有限公司	AR
乙醇	天津市博华通化工产品销售中心	AR

2.4 仪器和表征方法

(1) 玻璃仪器。

50 mL三颈圆底烧瓶、10 mL量筒、加料漏斗、250 mL烧杯、直形冷凝管、球形冷凝管、干燥管、250 mL抽滤瓶、布氏漏斗、50 mL单颈圆底烧瓶、玻璃棒、展开缸、毛细点样管、表面皿。

(2) 其他仪器。

移液枪、铁架台、铁夹、十字夹、镊子。

(3) 实验及测试仪器见表2。

表2 所用仪器名称、型号及其厂家

仪器名称及型号	厂家
电子分析天平ME204	梅特勒-托利多精密仪器及衡器制造商
电磁加热搅拌器	巩义市予华仪器有限责任公司
循环水真空泵	河南巩义实验仪器厂
ZF-6型三用紫外灯	上海嘉鹏科技有限公司
电热鼓风干燥箱	上海一恒科学仪器有限公司
核磁共振波谱仪ULTRASHIELD400	瑞士BRUKER公司
稳态/瞬态荧光光谱仪FLS1000	英国爱丁堡公司
紫外可见分光光度计UV-3150	日本岛津SHIMADZU公司
高效液相色谱仪LC-10AT	日本岛津SHIMADZU公司

(4) 分析测试方法。

① 核磁共振氢谱使用四甲基硅烷(TMS)作为内标, 氘代氯仿作为溶剂。

② 紫外吸收和荧光发射光谱分别使用液体和固体样品测试, 液体为 10^{-6} mol·L⁻¹浓度的二氯甲烷溶液, 固体为实验所得粉末。

③ 高效液相色谱使用C18色谱柱, 柱温为30 °C, 流动相为甲醇, 检测波长为290 nm。

2.5 实验步骤/方法

(1) 粗产品制备。

① 称取0.84 g (5 mmol)唑啉加入到50 mL三颈圆底烧瓶中, 再加入0.28 g (5 mmol)氢氧化钾和10.0 mL干燥的二甲基亚砜, 室温搅拌15 min至溶解; 最后加入0.24 mL (2 mmol) 1,2-二氟-4-溴苯。

② 如图8a搭建反应装置, 加热至140 °C反应, 溶液逐渐变为棕褐色。

③ 以石油醚和二氯甲烷(5 : 1, 体积比)为展开剂, 通过薄层色谱监测反应进度。反应1.5 h后, 可以监测到1,2-二氟-4-溴苯已反应完全。图8b为薄层板照片。

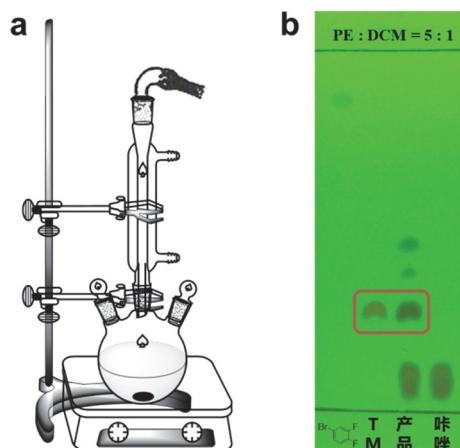


图8 (a) 反应装置图; (b) 反应体系的薄层板照片(254 nm照射)

④ 停止反应, 将混合物倒入200 mL饱和食盐水中, 搅拌均匀, 待固体完全析出后, 抽滤, 滤饼用100 mL饱和食盐水洗涤2次, 100 mL水洗3次, 收集米黄色滤饼。干燥称重, 计算收率。

(2) 回流洗涤。

① 取1.00 g粗产品加入到50 mL单颈圆底烧瓶中, 加入10.0 mL乙醇, 加热回流0.5 h。

② 停止加热。趁热过滤, 收集固体, 干燥称重, 计算回收率。

3 结果与讨论

3.1 实验收率

本实验以1,2-二氟-4-溴苯和过量的唑啉溶解在二甲基亚砜中, 在氢氧化钾作用下反应合成目标分子。反应1.5 h后, 抽滤洗涤得到米黄色粗产品1.01 g。取1.00 g粗产品, 用乙醇回流洗涤, 得到白色纯产品0.58 g。计算得实际产率为58.43% (如图9)。

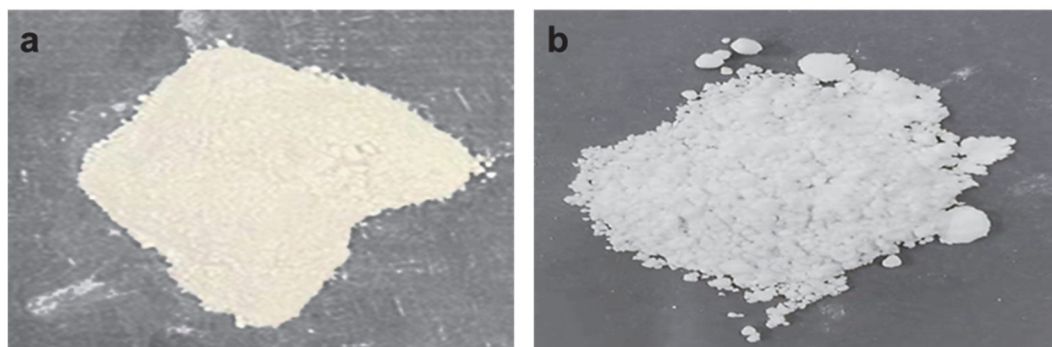


图9 回流洗涤前后产品外观

(a) 回流洗涤前; (b) 回流洗涤后

3.2 结构表征

目标产物1,2-二唑基-4-溴苯的结构及核磁氢谱如图10所示。分析数据如下: ^1H NMR (TMS, CDCl_3 , 400 MHz): δ = 8.074 (d, J = 2.0 Hz, 1H), 7.836 (m, 5H), 7.723 (d, J = 8.4 Hz, 1H), 7.256 (d, J = 8.0 Hz, 2H), 7.222 (d, J = 7.6 Hz, 2H), 7.143 (m, 8H)。化学位移为8.074的双重峰共1个氢, 有间位耦合, 为3位的氢; 化学位移为7.836的多重峰共5个氢, 是由化学位移接近的6、4'、5'、4''、5''位上的氢混合而成; 化学位移为7.723的两重峰共1个氢, 为5位的氢; 化学位移为7.256和7.222的两个两重峰为4个氢, 对应于1'、8'、1''、8''位的氢; 化学位移为7.143的多重峰有8个氢, 对应于唑啉剩下的氢。

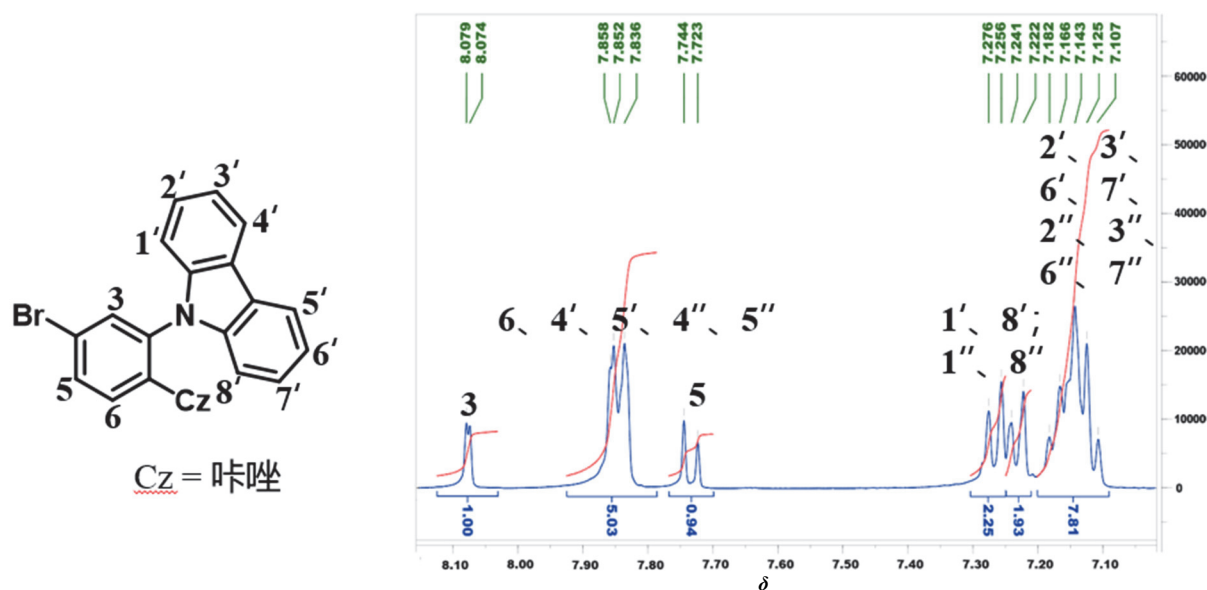


图10 1,2-二苄基-4-溴苯的结构及核磁共振氢谱

副产物1-氟-2-苄基-4-溴苯的结构及核磁氢谱如图11所示。分析数据如下： ^1H NMR (TMS, CDCl_3 , 400 MHz): δ = 8.193 (d, J = 10.6 Hz, 2H), 7.775 (dd, J_1 = 8.4 Hz, J_2 = 2.8 Hz, 1H), 7.700–7.582 (m, 1H), 7.507 (t, J = 10.0 Hz, 2H), 7.384 (t, J = 10.0 Hz, 2H), 7.351–7.259 (m, 3H)。化学位移为8.193的双重峰共2个氢，是4'和5'位的两个氢；化学位移为7.775的双重峰共1个氢，是5位氢；化学位移为7.700–7.582的多重峰共1个氢，是6位的氢；化学位移为7.507的三重峰共2个氢，是2'、7'位的氢；化学位移为7.384的三重峰共2个氢，是3'、6'位的氢；化学位移为7.351–7.259的多重峰共3个氢，是由1'、8'和3位的氢混合而成。

副产物N-甲基苄基的结构及核磁氢谱如图12所示。分析数据如下： ^1H NMR (TMS, CDCl_3 , 400 MHz): δ = 8.146 (d, J = 10.0 Hz, 2H), 7.615–7.476 (m, 2H), 7.430 (d, J = 11.2 Hz, 2H), 7.384–7.192

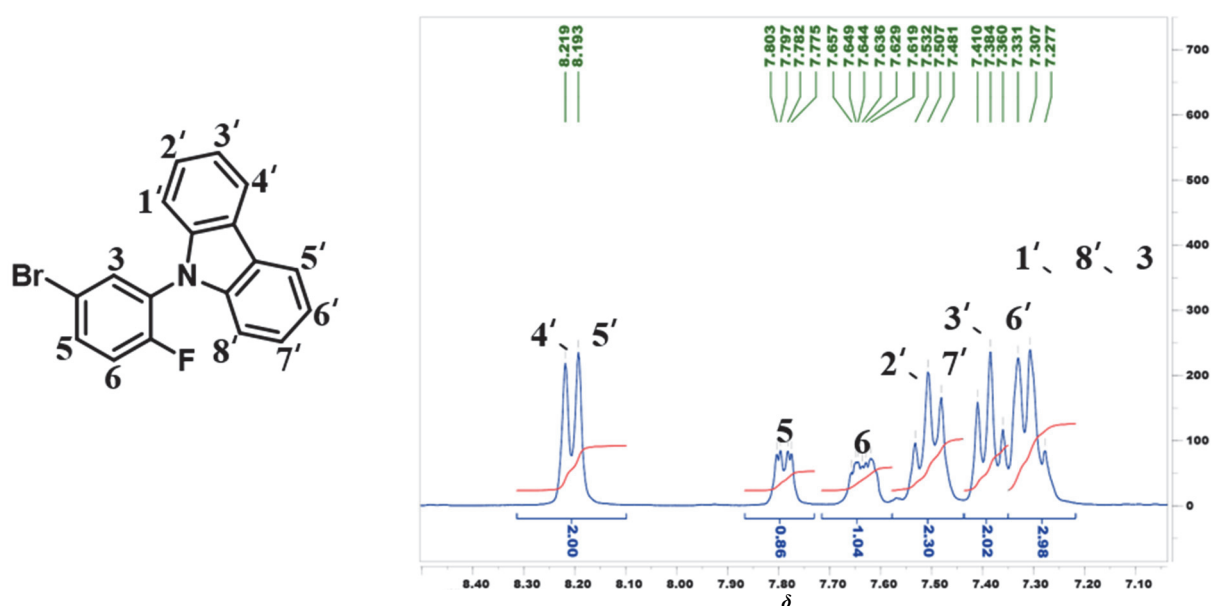


图11 1-氟-2-苄基-4-溴苯的结构及核磁共振氢谱

(m, 2H), 3.881 (s, 3H)。化学位移为8.146的双重峰共2个氢, 是4和5位的两个氢; 化学位移为7.615–7.476的多重峰共2个氢, 是2和7位上的氢; 化学位移为7.430的双重峰共2个氢, 是1和8位的氢; 化学位移为7.384–7.192的多重峰共2个氢, 是3和6位的氢; 化学位移为3.881的单峰共3个氢, 是甲基上的氢。

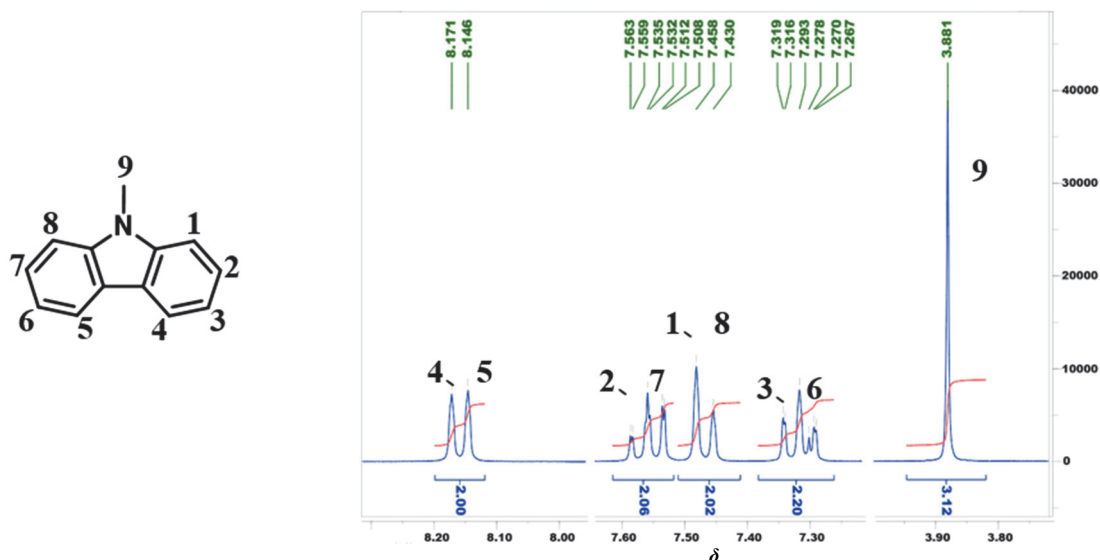


图12 *N*-甲基咔唑的结构及核磁共振氢谱

3.3 副产物生成过程推测

(1) 1-氟-2-咔唑基-4-溴苯的生成(如图13): 在氢氧化钾作用下, 咔唑失去氮上的氢, 形成氮负离子。由于氟的电负性比溴大, 因此氮负离子优先进攻与氟相连的碳(即1、2号碳); 而处于溴间位的2号碳电子云密度更低, 因此2号碳的反应活性大于1号碳。因此, 当1分子的咔唑与1,2-二氟-4-溴苯反应时会先生成单取代的1-氟-2-咔唑基-4-溴苯, 2分子的咔唑与1,2-二氟-4-溴苯反应才会生成双取代的1,2-二咔唑基-4-溴苯; 同时, 1-氟-2-咔唑基-4-溴苯也可以与1分子咔唑反应, 生成1,2-二咔唑基-4-溴苯。

(2) *N*-甲基咔唑的生成(如图14): 过量的咔唑与DMSO发生*N*-甲基化反应^[13,14]。长时间加热过程中, DMSO分解释放出二甲硫醚, 与咔唑的氮负离子发生亲核取代反应, 生成*N*-甲基咔唑。

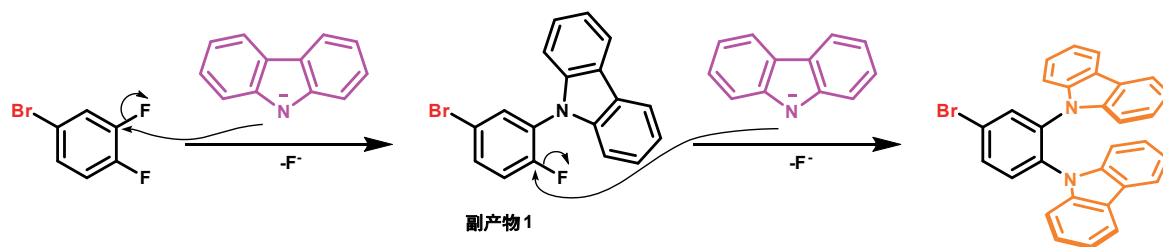


图13 副产物1-氟-2-咔唑基-4-溴苯和产物的生成

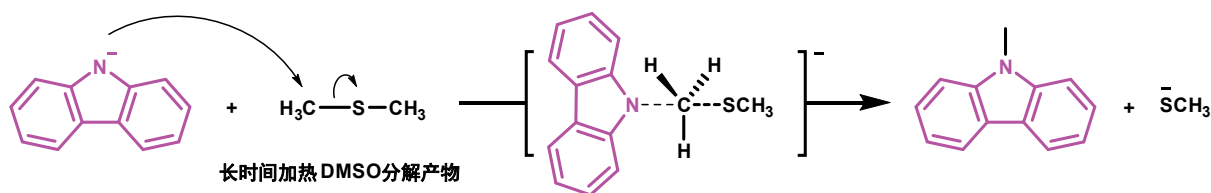


图14 副产物*N*-甲基咔唑的生成

3.4 反应条件优化

通过调节碱、投料比、反应时间、温度及后处理过程等(如图15), 对反应条件优化和筛选。

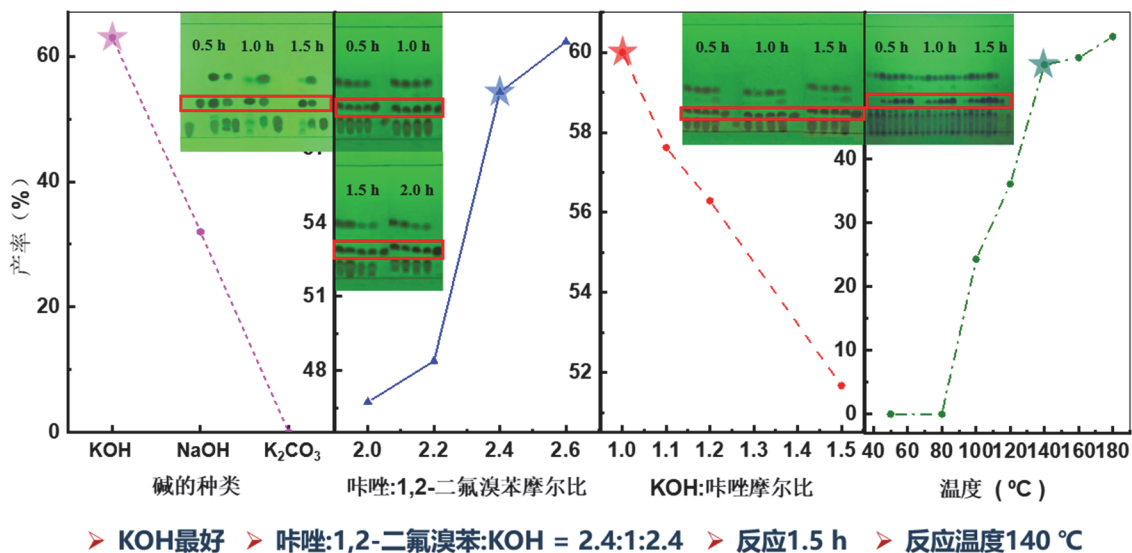


图15 反应条件优化

- (1) 碱的种类: 在 K_2CO_3 、NaOH和KOH中, KOH获得的产率最高。
- (2) 咪唑与二氟溴苯的摩尔比: 随着咪唑比例的增加, 产率逐渐升高; 在摩尔比为2.4和2.6时实现了58%以上的产率。咪唑过量太多会增大提纯难度, 再考虑到节约成本, 本实验选择摩尔比为2.4。
- (3) KOH与咪唑的摩尔比: 随着KOH比例的增加, 产率逐渐降低; 在摩尔比为1时, 反应产率最高。因此选择摩尔比为1。
- (4) 时间: 在上述条件下, 反应1.5 h后产率基本不变, 继续延长反应时间会导致副产物N-甲基咪唑的增加, 增大提纯难度。因此选择反应时间为1.5 h。
- (5) 温度: 在50 °C和80 °C下, 反应未发生; 在100 °C和120 °C下, 产率较低; 在140–180 °C之间, 产率较高。考虑到节约能源, 本实验选择了140 °C。
- (6) 回流洗涤条件: TLC和HPLC结果证明1.00 g粗产品对应10–50 mL乙醇可达到较满意的提纯效果。考虑到节约成本, 最终确定1.00 g对应10.0 mL乙醇(如图16)。

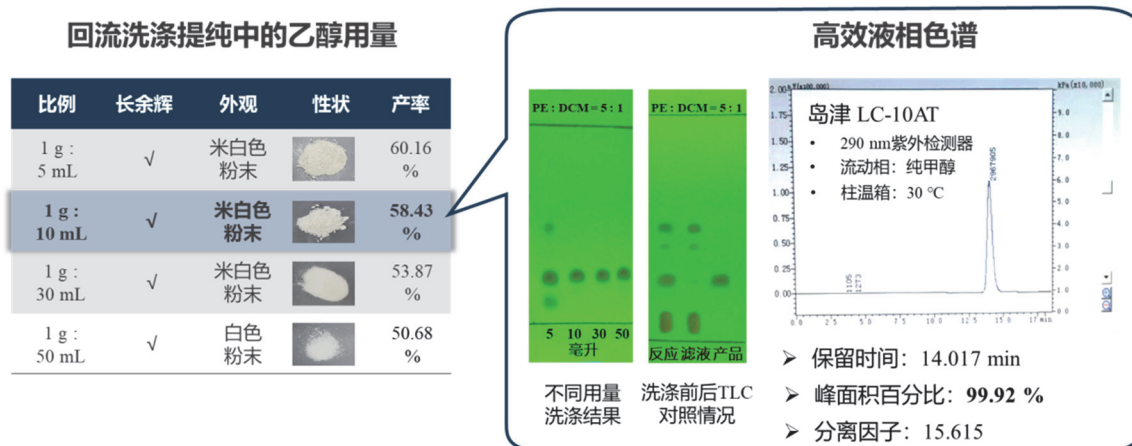


图16 乙醇回流洗涤条件优化

3.5 性质表征

将1,2-二咪唑基-4-溴苯配制成浓度为 10^{-6} mol·L⁻¹的二氯甲烷溶液。使用紫外可见分光光度计和稳态/瞬态荧光光谱仪测试其吸收和发射性质。如图17(a)所示, 1,2-二咪唑基-4-溴苯的紫外吸收光谱包含三组特征吸收带: 位于229 nm的吸收带对应于苯环的 $\pi-\pi^*$ 跃迁, 283 nm处的吸收对应于咪唑的 $\pi-\pi^*$ 跃迁, 333 nm处的吸收可以归属为氮、溴的 $n-\pi^*$ 跃迁。其最大发射峰位于400 nm, 发射峰在400–550 nm有较长的拖尾, 说明在稀溶液中仍有一定的分子间聚集。在77 K下测得的磷光光谱表现出明显的精细结构, 首峰在410 nm。

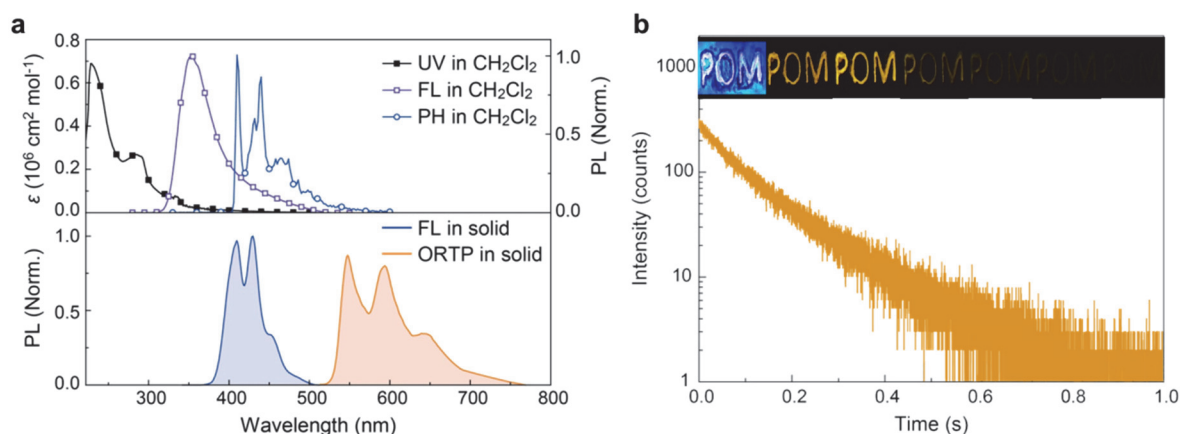


图17 1,2-二咪唑基-4-溴苯的紫外吸收光谱和稳态荧光光谱(a)及瞬态荧光光谱(b)

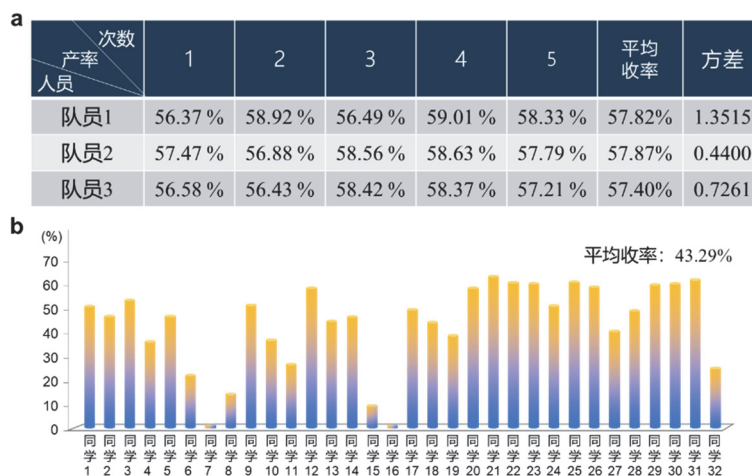
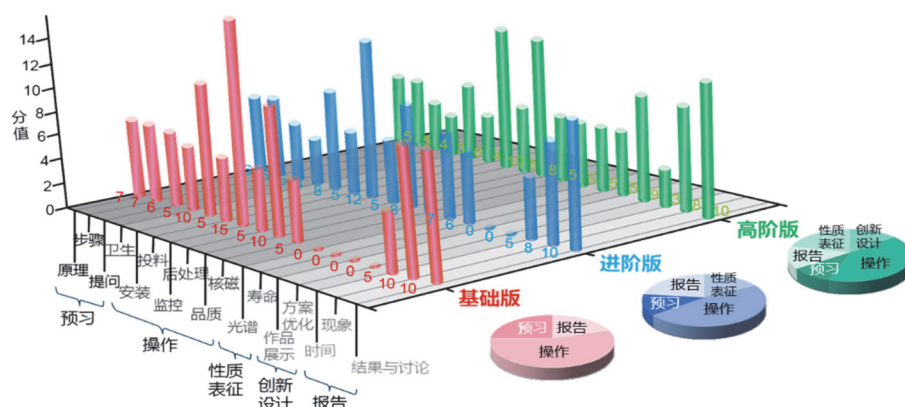
与稀溶液中的单分子光谱相比, 1,2-二咪唑基-4-溴苯在粉末态的室温荧光光谱发生了明显红移(如图17a), 证明存在固态分子间聚集。粉末态的发光包含两个组分, 即深蓝光的短寿命组分和黄光的长余辉组分。深蓝光的三组峰分别位于402、422和447 nm, 分别对应于单重态的0-0、0-1、0-2跃迁; 黄光的三组峰位于547、596、650 nm, 来源于聚集态的三重态磷光发射。如图17(b)所示, 其衰减曲线的拟合寿命为112.32 ms; 而肉眼可识别余辉时间长达1 s。曲线上方照片展示了1,2-二咪唑基-4-溴苯粉末的发光随时间变化情况, 关闭紫外灯后, 可直接地观察到长余辉发光。

3.6 教学实践

根据不同学科的学情分析, 我们将实验设置为三个版本, 即基础版(5.5学时)、进阶版(6.5学时)和高阶版(9.5学时)。基础版包含粗产品的制备、回流洗涤提纯以及核磁氢谱表征结构三部分, 可面向环境科学、化学工艺与工程、农学、生命科学等专业学生开设; 在此基础上, 进阶版增加了1学时的荧光性质表征, 高阶版进一步增加了3学时的正交实验和余辉作品展示部分; 可作为化学、应用化学、材料化学等学科的基础或专业实验开设。三个版本实验对学生能力的培养和考察侧重点各不相同, 考核成绩组成如图18所示, 通过本实验项目实现了对学生实践动手和创新能力的梯度化、层次化培养。在三个化学类专业中分别开展了不同版本的实验教学, 均达到了较好的重复性, 证明了本实验项目教学的可行性; 其中, 基础版实验中32名同学的平均收率可以达到43.29% (如图19)。最终, 调研了95名同学对本实验项目的心得体会, 三个版本的实验均受到了同学们的一致好评, 满意度均高于80% (如图20), 认为本实验项目现象明显、操作简单、锻炼全面且科研体验感强。

4 结语

本项目针对第四版《基础有机化学》教材对重难点内容的调整, 将芳香亲核取代反应加入本科有机化学实验教学中, 进一步加强学生对该反应机理的学习理解和运用; 与有机长余辉材料这一学术前沿热点相结合, 内容新颖, 趣味性强, 让学生充分领会合成反应对科学研究的支撑作用。合成



(a) 三名队员的实际产率; (b) 32名同学的实际产率

问卷调查

第1题：对实验的满意度 [单选题]

选项 #	小计 #	比例
满意	28	87.5%
不满意	4	12.5%

本题有效填写人次 **32**

第2题：满意的理由 [多选题]

选项 #	小计 #	比例
现象明显	28	100%
操作简单	24	85.71%
锻炼全面	25	89.29%
联系生活	23	82.14%
科研体验感强	24	85.71%

本题有效填写人次 **28**

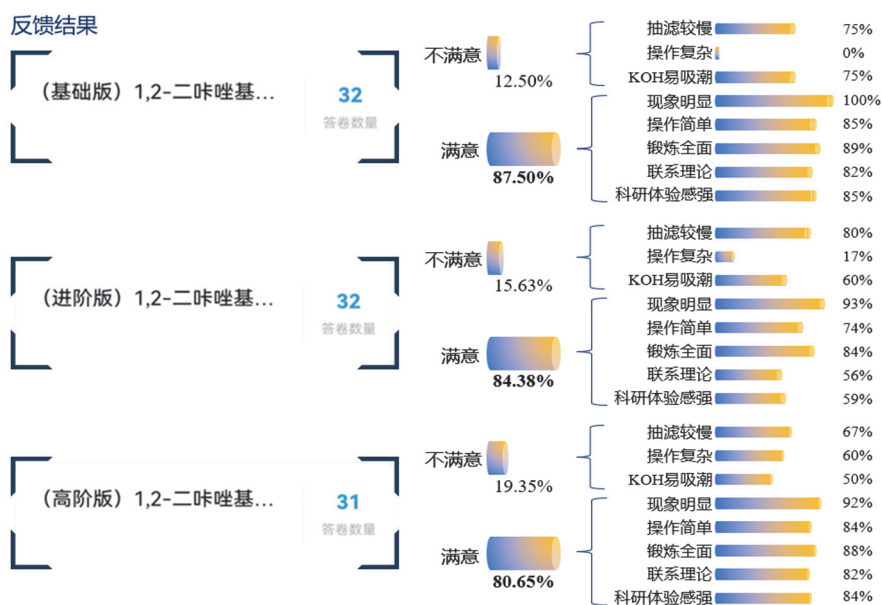
第3题：不满意的理由 [多选题]

选项 #	小计 #	比例
抽速较慢	3	75%
操作复杂	0	0%
KOH易受潮	3	75%

本题有效填写人次 **4**

第4题：请写出喜欢有机实验的理由 (可多条) [填空题]

第5题：请写出不喜欢有机化学实验的理由 (可多条) [填空题]



实验采用常规的反应装置, 实验现象明显, 收率适中; 结合后处理过程, 锻炼了学生的多个单元操作能力; 引入结构和性质表征环节, 通过现代分析测试技术, 展示科学研究先进手段, 树立了正确科学观念。“合成-结构-功能”的链条式教学, 培养了学生的科学素养和综合创新实践能力。本项目与理论教学衔接紧密, 危险系数低、成本低, 适于大规模推广; 同时, 注重基本实践能力和创新实践能力培养相结合, 密切联系前沿研究热点, 充分体现了“两性一度”的教学理念。

参 考 文 献

- [1] 张树永, 朱亚先. 中国大学教学, **2018**, No. 3, 25.
- [2] 衣馨瑶, 张翼, 阳明辉. 大学化学, **2023**, in press. doi: 10.3866/PKU.DXHX202202024
- [3] He, Z.; Zhao, W.; Lam, J. W. Y.; Peng, Q.; Ma, H.; Liang, G.; Shuai, Z.; Tang, B. *Nat. Commun.* **2017**, *8*, 416.
- [4] Xu, S.; Wang, W.; Li, H.; Zhang, J.; Chen, R.; Wang, S.; Zheng, C.; Xing, G.; Song, C.; Huang, W. *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 4802.
- [5] Ma, X.; Xu, C.; Wang, J.; Tian, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 10854.
- [6] 孙金鱼, 赵三虎, 赵明根. 海南师范大学学报(自然科学版), **2012**, *25* (1), 109.
- [7] 战长友, 李淑娥. 山东电大学报, **2000**, No. 1, 55.
- [8] 邢其毅, 裴伟伟, 徐瑞秋, 裴坚. 基础有机化学. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [9] 邢其毅, 裴伟伟, 徐瑞秋, 裴坚. 基础有机化学. 第4版. 北京: 北京大学出版社, 2017.
- [10] 战长友. 昌潍师专学报, **2000**, No. 2, 61.
- [11] 战长友. 曲阜师范大学学报(自然科学版), **2000**, *26* (2), 75.
- [12] An, Z.; Zheng, C.; Tao, Y.; Chen, R.; Shi, H.; Chen, T.; Wang, Z.; Li, H.; Deng, R.; Liu, X.; *et al.* *Nat. Mater.* **2015**, *14*, 685.
- [13] 张瑶, 曹美达, 王秋雪. 分子科学学报, **2017**, *33* (5), 396.
- [14] 姜雪. DMSO参与的N-甲基化反应的研究[硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2014.