

可见光诱导 α -重氮酯的脱氮氧合反应构建 α -氧代酰亚胺酯

刘瑞生^{†,a} 付双敏^{†,a} 楚秀民^a 张灵莉^a 丁柔^a
赵先恩^a 岳会兰^{*,b} 魏伟^{*,a,b}

(^a 曲阜师范大学化学与化工学院 山东曲阜 273165)

(^b 中国科学院藏药研究重点实验室 中国科学院西北高原生物研究所 青海西宁 810008)

摘要 报道了一种可见光诱导下 α -重氮酯与 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺(NHI)的脱氮氧合反应构建 α -氧代酰亚胺酯化合物的方法. 该反应采用 3W 蓝色 LEDs 灯为可见光源, 无需任何光催化剂, 室温下在 1,4-二氧六环溶剂中可以有效合成一系列 α -氧代酰亚胺酯化合物. 有趣的是, 当四氢呋喃作为溶剂时, 四氢呋喃参与的三组分开环产物可以获得中等至良好的收率. 该反应放大到克级规模仍保持良好的反应效率, 表明该方法具有合成 α -氧代酰亚胺酯的实际应用潜力.

关键词 可见光; α -重氮酯; *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺; α -氧代酰亚胺酯

Visible-Light-Induced Denitrification Oxygenation Reaction of α -Diazoesters to Construct α -Oxyimido Esters

Liu, Ruisheng^{†,a} Fu, Shuangmin^{†,a} Chu, Xiumin^a Zhang, Lingli^a Ding, Rou^a
Zhao, Xian'en^a Yue, Huilan^{*,b} Wei, Wei^{*,a,b}

(^a School of Chemistry and Chemical Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165)

(^b CAS Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008)

Abstract Visible-light-induced denitrification oxygenation reaction of α -diazoesters with *N*-hydroxyimides to access α -oxyimido esters has been developed. This reaction provides an efficient approach to synthesize a series of *N*-hydroxyimides at room temperature in 1,4-dioxane under irradiation of 3W blue LED lamps without any photocatalyst. Interestingly, when tetrahydrofuran (THF) was used as the solvent, structurally diverse α -oxyimido esters could be rapidly and efficiently obtained through a three-component coupling reaction of α -diazoesters, THF, and *N*-hydroxyimides. The reaction could conduct on a gram scale without a significant loss of reaction efficiency, indicating that this method could serve as a practical protocol to synthesize α -oxyimido esters.

Keywords visible-light; α -diazoester; *N*-hydroxyphthalimide; α -oxoimide ester

α -氧代酰亚胺酯类化合物及其衍生物是许多生物活性化合物和功能材料的重要结构单元. 例如化合物 **A** 对人卵巢癌细胞具有显著的抗癌活性^[1], 化合物 **B** 具有抑制水芹生长活性(Figure 1)^[2]. 此外, α -氧代酰亚胺酯作为关键的有机合成中间体, 被广泛应用于合成多类具有重要应用价值的有机化合物, 如抗菌^[3-6]、消炎^[7]和抗

惊厥化合物^[8]等. 因此, 开发简单、高效合成 α -氧代酰亚胺酯的方法受到化学家的高度关注. α -氧代酰亚胺酯传统的合成方法主要是 α -卤代酯与 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺或 *N*-羟基丁二甲酰亚胺的亲核取代反应, 该类反应会产生大量的卤化氢副产物. 近年来发展了一些可替换的 α -氧代酰亚胺酯类化合物的合成方法. 2015 年, 杜

* Corresponding authors. E-mail: weiqf@nwipb.cas.cn; hlyue@nwipb.cas.cn

Received April 6, 2022; revised May 2, 2022; published online May 17, 2022.

Project supported by the National Training Programs of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates (No. S202110446110), the Youth Innovation and Technology Project of High School in Shandong Province (No. 2019KJC021), the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2021MB065), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 22176109, 31900298) and the Innovation Platform Construction Project of Qinghai Province (No. 2022-ZJ-Y03).

国家级大学生创新创业训练项目(No. S202110446110)、山东省高校青创科技计划(No. 2019KJC021)、山东省自然科学基金(No. ZR2021MB065)、国家自然科学基金(Nos. 22176109, 31900298)和青海省创新平台建设专项(No. 2022-ZJ-Y03)资助项目.

[†] 共同第一作者(These authors contributed equally to this work).

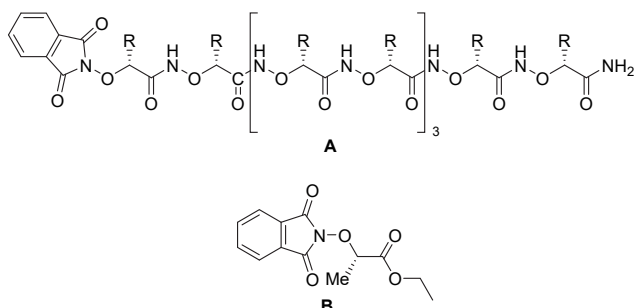


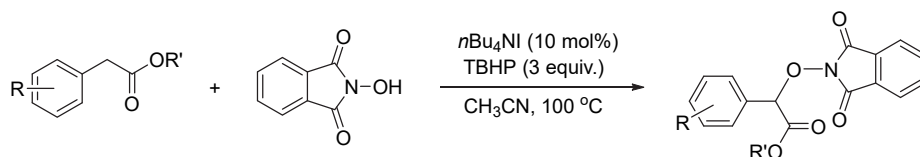
图1 具有生物活性的 α -氧代酰亚胺酯类衍生物
Figure 1 Biologically active α -oxyimido ester derivatives

云飞课题组^[9]报道了一种四丁基碘化铵/叔丁基过氧化氢(TBHP)体系介导的酯与 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺分子间的 C—H/O—H 交叉偶联反应合成 α -氧代酰亚胺酯的方法(Scheme 1a). 2020 年, Terent'ev 课题组^[10]采用 3 equiv.二叔丁基过氧化物作为氧化剂, 在 130~150 °C 苯溶剂中, 用酯或酮与 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺发生分子间的交叉脱氢 C—O 偶联反应来构建 α -氧代酰亚胺酯(Scheme 1b). 2022 年, 胡艾希课题组^[11]报道了一种电催化合成 α -氧代酰亚胺酯的方法(Scheme 1c). 该方法采用碳铂电极, *n*-BuNClO₄ 作为电解质, 在 10 mA 电流

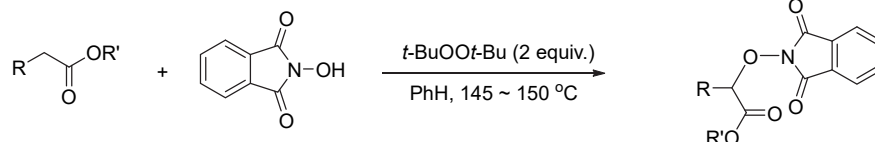
和氮气保护条件下完成苯乙酸甲酯衍生物与 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺的偶联反应(Scheme 1d). 这些方法虽然能以高原子经济性合成 α -氧代酰亚胺酯类化合物, 但大都需要加热和使用过氧化物氧化剂或特殊的反应装置来完成反应. 因此, 发展温和、简便和高效的合成 α -氧代酰亚胺酯类化合物的方法仍是迫切需要的.

重氮化合物特别是 α -碳基重氮化合物易于制备且具有较高反应活性, 作为一种多用途的有机合成砌块在有机化学和药物化学等领域有着广泛的应用^[12]. 近年来, 重氮化合物的反应研究得到了化学家们的高度重视, 被广泛应用于构建各种有机化合物^[13]. 2020 年, 姜波课题组^[14]报道了一种醋酸碘苯介导的 α -重氮羰基化合物和 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺(或氮羟基丁二酰亚胺)的去重氮双氧合反应, 合成了一系列 α,α -双氧代芳酮和 α,α -双氧代羧酸酯衍生物. 可见光诱导下重氮化合物的转化反应具有操作简单、无需使用金属催化剂和无机或有机氧化剂等优势. 该类反应使用能量低的可见光作为光源, 有效避免了一些不必要的副反应, 使得可见光诱导的重氮化合物反应通常能够以较高的反应效率形成自由卡宾, 进而完成多种类型的反应, 例如不饱和键的

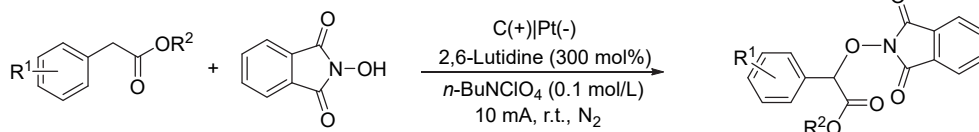
(a) Du's work:



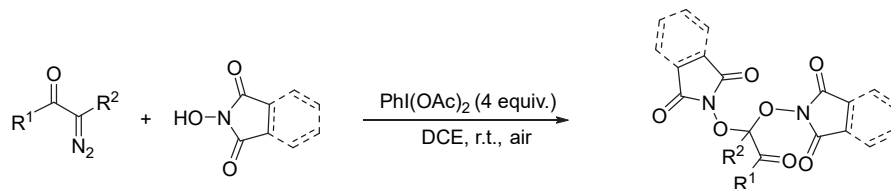
(b) Terent'ev's work:



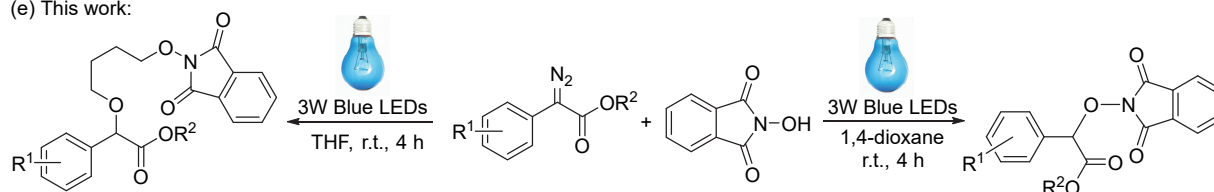
(c) Hu's work:



(d) Jiang's work:



(e) This work:



图式1 α -氧代酰亚胺酯类化合物合成策略
Scheme 1 Strategies for the synthesis of α -oxyimido esters

环丙烷化反应^[15]、叶立德反应^[16]、X—H 插入反应^[17] (X=C、O、N、Si 等)、Wolff 重排反应^[18]及多组分串联反应^[19]等。最近,我们课题组^[20]开发了一种可见光促进下 Eosin Y 催化的 α -重氮酯脱氮氧化合成 α -酮酯的方法。基于我们课题组在可见光催化反应研究兴趣的基础上,报道一种可见光诱导 α -重氮化合物和 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺去重氮氧合反应合成 α -氧代酰亚胺酯类化合物的方法(Scheme 1c)。该反应采用 3W 蓝色 LEDs 灯为可见光源,在 1,4-二氧六环溶剂中有效合成一系列 α -氧代酰亚胺酯化合物。值得注意的是,当四氢呋喃作为溶剂时,四氢呋喃参与的三组分开环产物可以获得中等至良好的收率。

1 结果与讨论

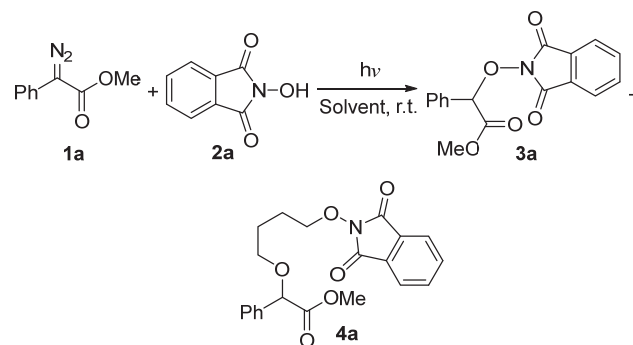
1.1 反应条件的优化

以 α -重氮酯(**1a**)和 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺(NHPI, **2a**)为模型底物,研究了不同光催化剂、不同溶剂和可见光源对反应产率的影响。实验结果如表 1 所示。首先以二氯甲烷(DCM)作为溶剂,以 3W 蓝光 LED 灯作为光源对光催化剂进行筛选。实验发现当曙红 Y (Eosin Y)、孟加拉玫瑰红(Rose Bengal)和 2,4,5,6-四(9-吡唑基)间苯二腈(4CzIPN)作为光催化剂时,产物 **3a** 分别获得了 72%、39%和 70%的收率(表 1, Entries 1~3)。进一步研究发现,在不加入光催化剂的条件下,产物 **3a** 的产率可以达到 74%(表 1, Entry 4)。上述结果表明光催化剂对反应并没有有利影响,加入孟加拉玫瑰红甚至导致产率降低,于是在后面的条件筛选中选择不使用光催化剂。当 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)和二甲基亚砜(DMSO)作为反应溶剂时没有产物生成(表 1, Entries 5, 6)。当乙腈(CH₃CN)、1,2-二氯乙烷(DCE)、氯仿(CHCl₃)、丙酮(Acetone)和乙酸乙酯(AcOEt)用作反应溶剂时,产物 **3a** 仅获得 26%~48%的收率(表 1, Entries 7~11)。令人高兴的是,当用 1,4-二氧六环(1,4-dioxane)作为反应溶剂时,**3a** 的产率提升到了 76%(表 1, Entry 12)。需要指出的是,当以四氢呋喃作为溶剂时,以高达 98%的产率得到了四氢呋喃参与的开环产物 **4a** (表 1, Entry 13)。1,4-二氧六环作为反应溶剂时,没有检测到 1,4-二氧六环参与的开环产物。接下来,以 1,4-二氧六环作为反应溶剂,考察了不同光源对反应效率的影响。当反应在 3W 白光、3W 绿色和 3W 紫光 LED 灯照射条件下,相比于 3W 蓝光 LED 灯照射时反应效率大大降低,相应产物 **3a** 分别仅获得 15%、10%和 18%的产率(表 1, Entries 14~16)。无光照条件下,没有检测到产物 **3a** 和 **4a**(表 1, Entries 17, 18)。最终,经过上述条件筛选,得出了最优的反应条件:以 1,4-二氧六环为溶剂,3W 蓝光为光源,反应中不添加任何光催化

剂和添加剂。

表 1 反应条件优化^a

Table 1 Optimization of reaction conditions



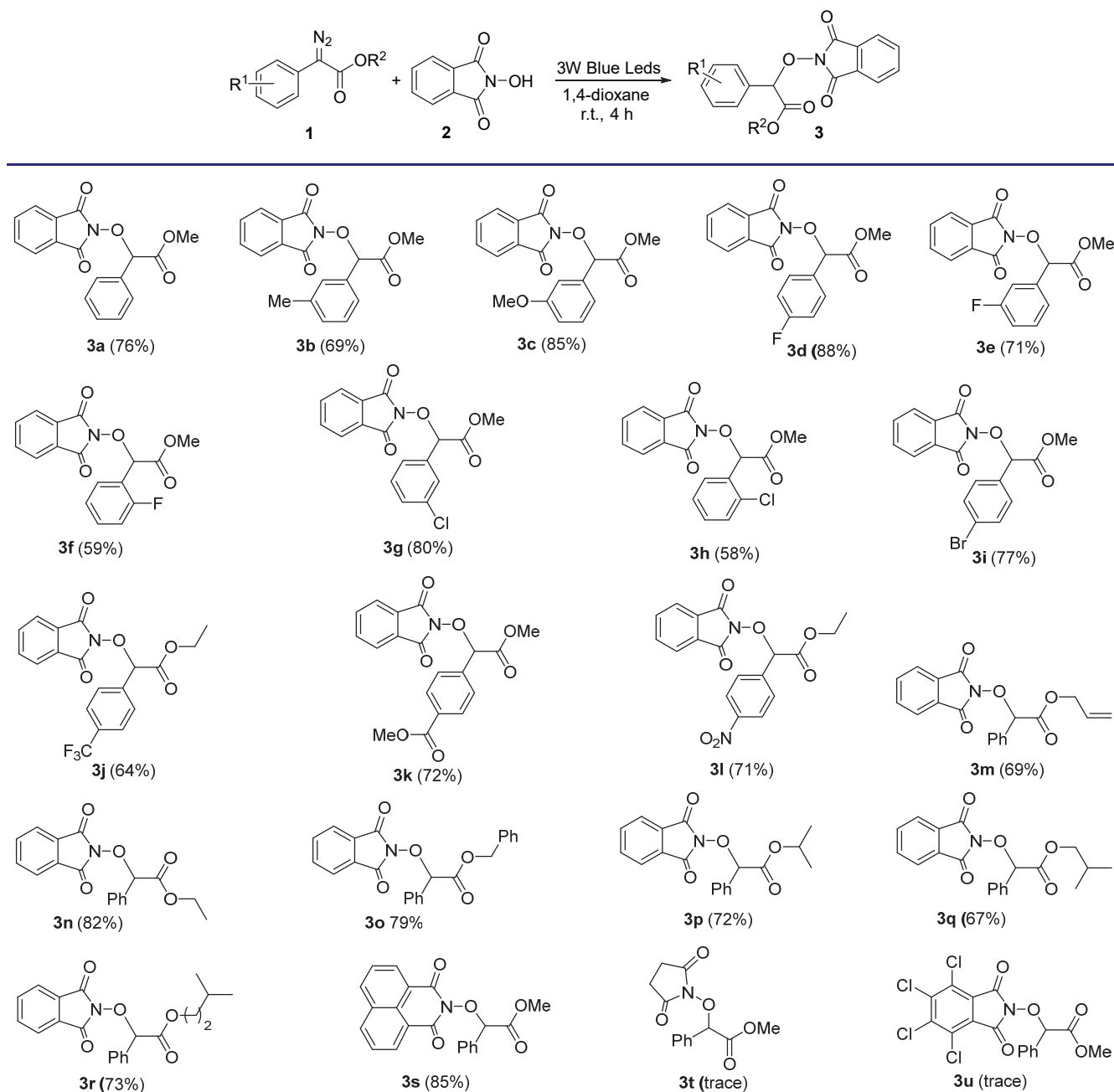
Entry	Photocatalyst	Solvent	Yield ^b /%	
			3a	4a
1	Eosin Y	CH ₂ Cl ₂	72	0
2	Rose Bengal	CH ₂ Cl ₂	39	0
3	4CzIPN	CH ₂ Cl ₂	70	0
4	—	CH ₂ Cl ₂	74	0
5	—	DMF	0	0
6	—	DMSO	0	0
7	—	CH ₃ CN	48	0
8	—	DCE	33	0
9	—	CHCl ₃	26	0
10	—	Acetone	43	0
11	—	AcOEt	38	0
12	—	1,4-Dioxane	76	0
13	—	THF	0	98
14	—	1,4-Dioxane	15 ^c	0
15	—	1,4-Dioxane	10 ^d	0
16	—	1,4-Dioxane	18 ^e	0
17	—	1,4-Dioxane	0 ^f	0
18	—	THF	0	0 ^f

^a Reaction conditions: **1a** (0.2 mmol), **2a** (0.1 mmol), photocatalyst (2 mol%), solvent (2 mL), air, 4 h; ^b Isolated yield based on **2a**; ^c 3 W white LEDs; ^d 3 W green LEDs; ^e Purple LEDs; ^f Without light irradiation.

1.2 反应底物的拓展

在最优条件下,对不同取代基的 α -重氮酯和 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺进行了底物普适性研究(表 2)。首先以 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺(**2a**)为代表性底物考察了 α -重氮酯化合物上取代基 R¹ 与 R² 的适用范围。结果表明含吸电子和供电子基 R¹ 取代的 α -重氮酯都能较好地与 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺反应,以 59%~88%的产率得到产物 **3a**~**3l**。观察到空间位阻对产率的影响很大,当 F 原子取代基在对位时,产物 **3d** 的产率为 88%;当 F 原子取代基在邻位时,产物 **3e** 的产率下降为 59%。值得注意的是,卤素、酯基和硝基等多种官能团对该反应条件具有良好的耐受性,能以中等至良好的产率得到的产物,可用于后续结构修饰。 α -重氮酯化合物上 R² 取代基拓展结果表明,除了甲基外,其它取代基如烯丙基、乙基、苄基、异丙基以及长链烷基都可以很好适用于该反应,

表 2 合成产物 3 的底物范围 ^{a,b}
Table 2 Substrate scope for the synthesis of product 3



^a Reaction conditions: **1** (0.2 mmol), **2** (0.1 mmol), 3W blue LEDs, 1,4-dioxane (2 mL), air, r.t., 4 h. ^b Isolated yield based on **2**.

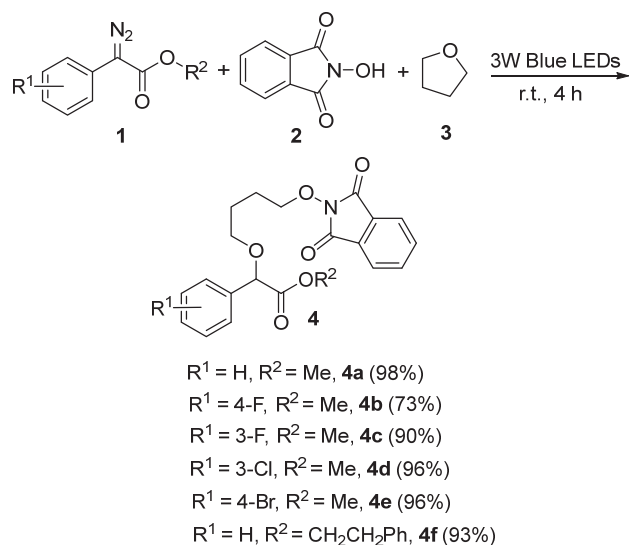
以 67%~82% 收率得到产物 **3m**~**3r**. 此外, 当 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺替换为 *N*-羟基-1,8-萘二甲酰亚胺时, 产物 **3s** 可以获得 85% 的收率. 但是, 当 *N*-羟基丁二酰亚胺和 3,4,5,6-四氯-*N*-羟基邻苯二甲酰亚胺用作反应底物时, 仅有极少量产物 **3t** 和 **3u** 生成.

随后, 在四氢呋喃作为反应底物和溶剂时, 对合成产物 **4** 进行了底物扩展研究. 如 Scheme 2 所示, 当芳环 **R**¹ 上为 F、Cl、Br 取代基和 **R**² 为苯乙基时, 都可以很好地兼容该反应条件, 相应的产物 **4b**~**4f** 可以获得

73%~96% 的产率. 可是, 当链状醚如乙醚、正丁醚被用于该反应时没有产物生成.

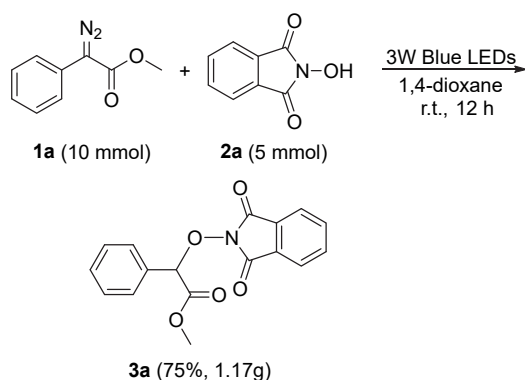
1.3 放大剂量实验

为了验证反应的实际应用价值, 对反应进行了放大实验. 如 Scheme 3 所示, 当模型反应 **1a** (10 mmol) 和 **2a** (5 mmol) 在 3W 蓝光 LED 灯照射下进行反应 12 h 后, 能以 75% 收率分离得到相应的产物 **3a** (1.12 g). 实验结果表明反应扩大到克级规模时, 仍然保持较好的反应效率, 具有一定的实际应用潜力.



图式 2 合成产物 4

Scheme 2 Synthesis of product 4

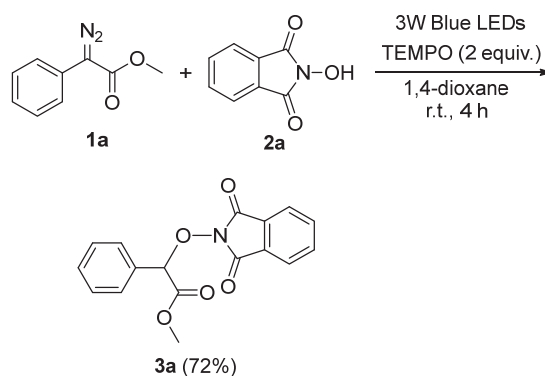


图式 3 克级规模反应

Scheme 3 Gram-scale reaction

1.4 反应机理探讨

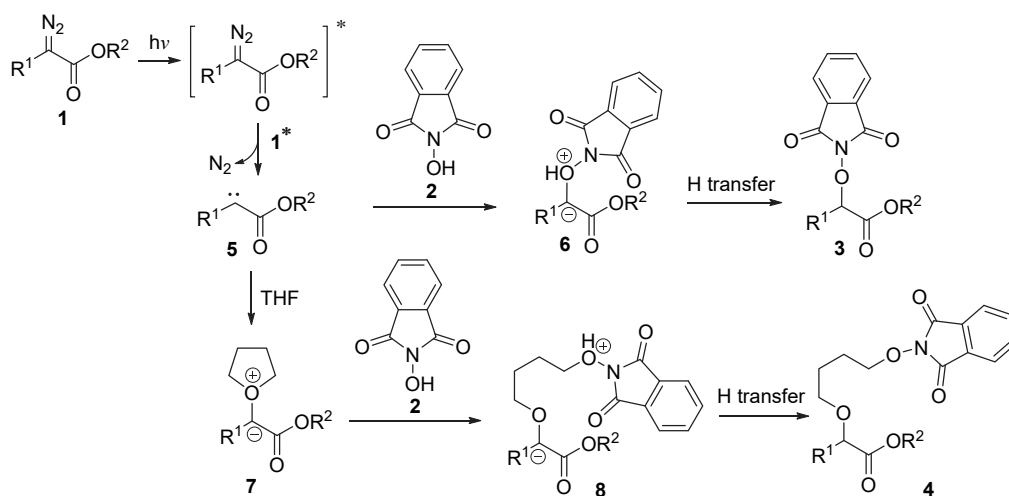
为了探究可能的反应机理,开展了自由基捕捉实验.如Scheme 4所示,当在芳基 α -重氮酯与 N -羟基邻苯二甲酰亚胺的反应体系中加入 2 equiv.的自由基抑制剂四甲基哌啶氧化物(TEMPO)后,该反应没有受到很大影响,产率仍达到 72%.研究结果表明 α -重氮酯和 N -羟基邻苯二甲酰亚胺合成 α -氧代酰亚胺酯的反应可能并不涉及自由基历程.



图式 4 控制实验

Scheme 4 Control experiment

基于上述实验结果和文献报道^[13,15a,19],提出了一种可能的反应机理(Scheme 5).重氮化合物 **1** 在光照下被激发形成激发态 **1***,其快速分解脱掉 N_2 得到碳卡宾中间体 **5**.当在 1,4-二氧六环溶剂中时, N -羟基邻苯二甲酰亚胺与中间体 **5** 发生亲核取代反应得到中间体 **6**.中间体 **6** 通过氢质子转移得到产物 **3**.当溶剂为四氢呋喃时,得到的产物 **4** 可能是由于四氢呋喃的亲核能力强于 N -羟基邻苯二甲酰亚胺,所以,卡宾中间体 **5** 会被四氢呋



图式 5 可能的反应机理

Scheme 5 Possible reaction mechanism

喃快速地亲核捕捉形成中间体 **7**。随后, *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺与 **7** 的醚氧原子 α 碳发生亲核取代反应得到开环中间体 **8**。最后, 中间体 **8** 通过氢质子转移生成相应的产物 **4**。

2 结论

总之, 成功发展了一种可见光诱导下 α -重氮酯和 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺进行脱氮氧合反应合成 α -氧代酰亚胺酯类化合物的方法。该方法直接利用 3W 蓝色 LED 灯照射反应体系, 无需任何光催化剂、金属试剂和添加剂, 在室温下就可以有效地完成一系列 α -氧代酰亚胺酯的构建。值得注意的是, 当四氢呋喃作为溶剂时, 可以得到四氢呋喃参与的三组分开环产物。该反应可以有效放大到克级规模, 仍能保持良好的反应效率, 为 α -氧代酰亚胺酯类化合物的合成提供了一种简单高效的绿色合成方法。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

实验仪器: 分析天平(i-Quip 型, 芯硅谷), 100 μ L 单道可调移液枪[大龙兴创实验仪器(北京)有限公司], 循环水真空泵(SHZ-S(III)型, 上海力辰邦西仪器科技有限公司), 旋转蒸发仪(亚荣, RE-52AA), 紫外线分析仪(ZF-20A 型, 上海越众仪器设备有限公司), 加热磁力搅拌器(龙口市先科仪器公司, 79-1), 硅胶粉(烟台新诺化工有限公司, 200~300 目), 核磁共振波谱仪(Bruker Avance III 500MHz 型), 高分辨液相色谱质谱联用仪(1290InfinityII/6564), 显微热分析仪(WRX-1S, 上海精密科学)。

实验试剂: 石油醚(分析纯, 天津富宇)、四氢呋喃(分析纯, 麦克林)、乙酸乙酯(分析纯, 芯硅谷)、1,4-二氧六环(分析纯, 麦克林)、乙二醇二甲醚(分析纯, 天津富宇)、乙醇(分析纯, 天津富宇)、1,2-二氯乙烷(分析纯, 麦克林)、乙腈(分析纯, 天津富宇)、丙酮(分析纯, 天津富宇)、氮-羟基邻苯二甲酰亚胺(97%, 麦克林)、Eosin Y(阿拉丁)、 α -重氮酯依据文献制备^[21]。

3.2 实验方法

在室温条件下, 向 10 mL 光反应管中加入 α -重氮酯(0.2 mmol)、*N*-羟基邻苯二甲酰亚胺(0.1 mmol), 用 1,4-二氧六环(2 mL)润洗反应管内壁。然后将反应管置于 3W 蓝光光反应器下, 空气中搅拌 4 h, 用薄层色谱(TLC)检测反应的完成情况。当原料反应完成后, 将反应液转移到 50 mL 圆底烧瓶中, 加入硅胶粉后减压蒸干溶剂。选择 $V(\text{石油醚}): V(\text{乙酸乙酯})=10:1$ 柱层析分离得到 α -氧代酰亚胺酯。

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-苯乙酸甲酯(**3a**): 白色固体, 23.6 mg, 产率 76%。m.p. 118~119 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.80~7.78 (m, 2H), 7.74~7.71 (m, 2H), 7.62~7.60 (m, 2H), 7.40~7.39 (m, 3H), 5.88 (s, 1H), 3.80 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 168.3, 163.1, 134.6, 132.6, 130.1, 128.7, 128.7, 123.7, 85.6, 52.8; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{14}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 312.0872, found 312.0877.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-(间甲基)乙酸甲酯(**3b**): 白色固体, 26.9 mg, 产率 69%。m.p. 110~111 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.80~7.78 (m, 2H), 7.73~7.71 (m, 2H), 7.49 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.19 (d, $J=7.9$ Hz, 2H), 5.85 (s, 1H), 3.79 (s, 3H), 2.34 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 168.4, 163.1, 140.2, 134.5, 129.6, 129.4, 128.8, 128.7, 123.6, 85.5, 52.7, 21.4; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 326.1028, found 326.1029.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-(间氧苯基)乙酸甲酯(**3c**): 白色固体, 29.1 mg, 产率 85%。m.p. 121~122 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.80~7.78 (m, 2H), 7.73~7.71 (m, 2H), 7.30~7.27 (m, 1H), 7.21~7.20 (m, 1H), 7.15~7.14 (m, 1H), 6.94~6.92 (m, 1H), 5.87 (s, 1H), 3.84 (s, 3H), 3.80 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 168.2, 163.1, 159.7, 134.6, 133.9, 129.7, 128.8, 123.7, 121.0, 116.3, 113.4, 85.5, 55.4, 52.8; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{NO}_6$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 342.0978, found 342.0982.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-(4-氟苯基)乙酸甲酯(**3d**): 白色固体, 29.0 mg, 产率 88%。m.p. 130~131 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.81~7.79 (m, 2H), 7.74~7.73 (m, 2H), 7.62~7.59 (m, 2H), 7.08 (t, $J=5.7$ Hz, 2H), 5.85 (s, 1H), 3.80 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 168.1, 163.8 (d, $J=248.3$ Hz), 163.1, 134.6, 130.8 (d, $J=8.7$ Hz), 128.7, 128.5 (d, $J=3.3$ Hz), 123.7, 115.9, 115.8, 84.9, 52.8; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{13}\text{FNO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 330.0778, found 330.0779.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-(2-氟苯基)乙酸甲酯(**3e**): 白色固体, 19.4 mg, 产率 59%。m.p. 141~142 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.81~7.78 (m, 2H), 7.75~7.70 (m, 3H), 7.42~7.37 (m, 1H), 7.22 (t, $J=7.6$ Hz, 1H), 7.07 (t, $J=9.1$ Hz, 1H), 6.17 (s, 1H), 3.82 (s, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 167.6, 162.9, 161.0 (d, $J=249.1$ Hz), 134.6, 132.0 (d, $J=8.4$ Hz), 130.3 (d, $J=2.5$ Hz), 128.7, 124.6 (d, $J=3.7$ Hz), 123.7, 120.5 (d, $J=13.6$ Hz), 115.7 (d, $J=21.2$ Hz), 78.8 (d, $J=3.3$ Hz),

52.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{17}H_{13}FNO_5$ $[M+H]^+$ 330.0778, found 330.0781.

2-(4-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)丁氧基)-2-(3-氟苯基)乙酸甲酯(**3f**): 白色固体, 23.4 mg, 产率 71%. m.p. 108~109 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.84~7.82 (m, 2H), 7.76~7.74 (m, 2H), 7.34~7.30 (m, 1H), 7.24~7.22 (m, 1H), 7.20~7.17 (m, 1H), 7.03~6.99 (m, 1H), 4.89 (s, 1H), 4.26~4.25 (m, 2H), 3.72 (s, 3H), 3.68~3.64 (m, 1H), 3.58~3.55 (m, 1H), 1.92~1.91 (m, 4H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.8, 162.6 (d, $J=246.1$ Hz), 163.0, 134.8 (d, $J=7.5$ Hz), 134.7, 130.3 (d, $J=8.1$ Hz), 128.7, 124.3 (d, $J=3.0$ Hz), 123.8, 117.1 (d, $J=20.9$ Hz), 115.7 (d, $J=22.7$ Hz), 85.0, 52.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{17}H_{13}FNO_5$ $[M+H]^+$ 330.0778, found 330.0779.

2-(3-氯苯基)-2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)乙酸甲酯(**3g**): 白色固体, 27.5 mg, 产率 80%. m.p. 113~114 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.82~7.81 (m, 2H), 7.75~7.74 (m, 2H), 7.62 (s, 1H), 7.53 (d, $J=7.5$ Hz, 1H), 7.39~7.33 (m, 3H), 5.82 (s, 1H), 3.81 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.8, 163.1, 134.7, 134.6, 134.5, 130.3, 130.0, 128.7, 128.7, 126.6, 123.8, 84.9, 53.0; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{17}H_{13}ClNO_5$ $[M+H]^+$ 346.0482, found 346.0485.

2-(2-氯苯基)-2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)乙酸甲酯(**3h**): 白色固体, 19.9 mg, 产率 58%. m.p. 113~114 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.83~7.78 (m, 3H), 7.75~7.72 (m, 2H), 7.38~7.33 (m, 3H), 6.36 (s, 1H), 3.81~3.80 (m, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.6, 162.9, 134.6, 134.5, 131.1, 131.1, 130.2, 129.6, 128.7, 127.3, 123.7, 81.6, 52.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{17}H_{13}ClNO_5$ $[M+H]^+$ 346.0482, found 346.0486.

2-(4-溴苯基)-2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)乙酸甲酯(**3i**): 白色固体, 29.9 mg, 产率 77%. m.p. 121~122 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.81~7.79 (m, 2H), 7.75~7.73 (m, 2H), 7.52~7.51 (m, 4H), 5.83 (s, 1H), 3.79 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.9, 163.1, 134.7, 132.0, 131.6, 130.3, 128.7, 124.5, 123.8, 84.9, 52.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{17}H_{13}BrNO_5$ $[M+H]^+$ 389.9977, found 389.9979.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-(4-(三氟甲基)苯基)乙酸乙酯(**3j**): 白色固体, 25.1 mg, 产率 64%. m.p. 108~109 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.82~7.81 (m, 2H), 7.78~7.74 (m, 4H), 7.67~7.66 (m, 2H), 5.90 (s, 1H), 4.28~4.25 (m, 2H), 1.28~1.25 (t, $J=7.1$

Hz, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.2, 163.1, 136.7, 134.8, 132.0 (d, $J=32.5$ Hz), 128.8, 128.7, 125.7 (q, $J=3.6$ Hz), 123.8, 85.0, 62.3, 14.0; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{19}H_{15}F_3NO_5$ $[M+H]^+$ 394.0902, found 394.0905.

4-(1-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-甲氧基-2-氧代乙基)苯甲酸甲酯(**3k**): 白色固体, 26.4 mg, 产率 72%. m.p. 160~161 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 8.06 (d, $J=8.2$ Hz, 2H), 7.81~7.79 (m, 2H), 7.75~7.73 (m, 2H), 7.70 (d, $J=8.3$ Hz, 2H), 5.92 (s, 1H), 3.92 (s, 3H), 3.80 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.8, 166.5, 163.1, 137.3, 134.7, 131.6, 129.9, 128.7, 128.5, 123.8, 85.1, 53.0, 52.3; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{19}H_{16}NO_7$ $[M+H]^+$ 370.0927, found 370.0931.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-(4-硝基苯基)乙酸甲酯(**3l**): 白色固体, 26.3 mg, 产率 71%. m.p. 122~123 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 8.26 (d, $J=8.7$ Hz, 2H), 7.86~7.81 (m, 4H), 7.78~7.75 (m, 2H), 5.93 (s, 1H), 4.31~4.24 (m, 2H), 1.27 (t, $J=7.1$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 166.7, 163.0, 148.8, 139.7, 134.9, 129.4, 128.6, 123.9, 123.8, 84.7, 62.6, 14.0; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{18}H_{15}N_2O_7$ $[M+H]^+$ 371.0879, found 371.0881.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-苯乙酸烯丙酯(**3m**): 白色固体, 23.3 mg, 产率为 69%. m.p. 84~85 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.80~7.77 (m, 2H), 7.74~7.71 (m, 2H), 7.63~7.61 (m, 2H), 7.40~7.38 (m, 3H), 5.90 (s, 1H), 5.90~5.83 (m, 1H), 5.26~5.18 (m, 2H), 4.69 (d, $J=5.7$ Hz, 2H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.5, 163.1, 134.6, 132.6, 131.2, 130.1, 128.8, 128.7, 128.7, 123.7, 119.0, 85.6, 66.3; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{19}H_{16}NO_5$ $[M+H]^+$ 338.1028, found 338.10232.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-苯基乙酸乙酯(**3n**): 白色固体, 28.5 mg, 产率 82%. m.p. 107~108 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.80~7.78 (m, 2H), 7.73~7.71 (m, 2H), 7.63~7.61 (m, 2H), 7.40~7.38 (m, 3H), 5.87 (s, 1H), 4.30~4.22 (m, 2H), 1.26 (t, $J=7.2$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ : 167.8, 163.1, 134.6, 132.7, 130.0, 128.8, 128.7, 128.7, 123.6, 85.7, 61.9, 14.0; HRMS (ESI-TOP) calcd for $C_{18}H_{16}NO_5$ $[M+H]^+$ 326.1028, found 326.1031.

2-((1,3-二氧代异吲哚啉-2-基)氧基)-2-苯乙酸苄酯(**3o**): 白色固体, 30.4 mg, 产率 79%. m.p. 114~115 °C; 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.78~7.76 (m, 2H), 7.72~7.70 (m, 2H), 7.60~7.58 (m, 2H), 7.39~7.36 (m,

3H), 7.28~7.24 (m, 5H), 5.93 (s, 1H), 5.25~5.18 (m, 2H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 167.7, 163.1, 135.0, 134.5, 132.5, 130.1, 128.8, 128.7, 128.5, 128.4, 128.2, 123.6, 85.6, 67.4; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{23}\text{H}_{18}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 388.1185, found 388.1187.

2-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)-2-苯乙酸异丙酯(**3p**): 白色固体, 24.5 mg, 产率为 72%. m.p. 107~108 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.80~7.77 (m, 2H), 7.74~7.70 (m, 2H), 7.62~7.60 (m, 2H), 7.40~7.38 (m, 3H), 5.84 (s, 1H), 5.15~5.10 (m, 1H), 1.27 (d, $J=6.3$ Hz, 3H), 1.18 (d, $J=6.3$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 167.9, 163.1, 134.5, 132.9, 130.0, 128.8, 128.6, 123.6, 85.6, 71.7, 27.6, 18.8; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{18}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 340.1185, found 340.1188.

2-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)-2-苯乙酸异丁酯(**3q**): 黄色油状, 23.6 mg, 产率 67%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.80~7.78 (m, 2H), 7.73~7.71 (m, 2H), 7.63~7.61 (m, 2H), 7.39~7.38 (m, 3H), 5.89 (s, 1H), 4.02~3.98 (m, 1H), 3.96~3.92 (m, 1H), 1.94~1.88 (m, 1H), 0.83 (d, $J=6.8$ Hz, 6H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 167.4, 163.1, 134.5, 132.9, 129.9, 128.8, 128.7, 128.6, 123.6, 85.7, 69.8, 21.6, 21.4; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{20}\text{H}_{20}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 354.1341, found 354.1344.

2-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)-2-苯乙酸异戊酯(**3r**): 黄色油状, 26.7 mg, 产率 73%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.80~7.77 (m, 2H), 7.74~7.71 (m, 2H), 7.63~7.60 (m, 2H), 7.40~7.38 (m, 3H), 5.87 (s, 1H), 4.22 (t, $J=6.8$ Hz, 2H), 1.58~1.53 (m, 1H), 1.52~1.48 (m, 2H), 0.84~0.83 (m, 6H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 167.9, 163.1, 134.5, 132.7, 130.0, 128.8, 128.7, 128.7, 123.6, 85.6, 64.6, 37.0, 24.9, 22.3; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{22}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 368.1498, found 368.1499.

2-((1,3-二氧代-1*H*-苯并[脱]异喹啉-2(3*H*)-基)氧基)-2-苯乙酸甲酯(**3s**): 黄色油状, 30.7 mg, 产率 85%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 8.59~8.57 (m, 2H), 8.23~8.21 (m, 2H), 7.75 (t, $J=7.8$ Hz, 2H), 7.69~7.67 (m, 2H), 7.38~7.37 (m, 3H), 5.92 (s, 1H), 3.81 (s, 3H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 168.9, 160.9, 134.6, 133.2, 131.8, 129.7, 128.7, 128.6, 127.4, 127.1, 122.6, 85.5, 52.7; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{16}\text{NO}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 362.1028, found 362.1031.

2-(4-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)丁氧基)-2-苯乙酸甲酯(**4a**): 黄色油状, 37.5 mg, 产率 98%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.76~7.74 (m, 2H), 7.67~7.65 (m,

2H), 7.37~7.36 (m, 2H), 7.29~7.23 (m, 3H), 4.81 (s, 1H), 4.18~4.14 (m, 2H), 3.62 (s, 3H), 3.58~3.54 (m, 1H), 3.45~3.45 (m, 1H), 1.85~1.80 (m, 4H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 170.4, 162.6, 135.6, 133.4, 127.9, 127.6, 127.6, 126.1, 122.4, 80.0, 77.1, 68.1, 51.2, 24.7, 23.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{22}\text{NO}_6$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 384.1447, found 384.1449.

2-(4-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)丁氧基)-2-(4-氟苯基)乙酸甲酯(**4b**): 黄色油状, 29.3 mg, 产率 73%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.85~7.82 (m, 2H), 7.76~7.74 (m, 2H), 7.44~7.41 (m, 2H), 7.27 (s, 7.27), 7.04 (t, $J=10.0$ Hz, 2H), 4.87 (s, 1H), 4.27~4.21 (m, 2H), 3.71 (s, 3H), 3.66~3.62 (m, 1H), 3.56~3.51 (m, 1H), 1.94~1.87 (m, 4H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 171.3, 163.6, 162.9 (d, $J=245.7$ Hz), 134.5, 132.5 (d, $J=3.1$ Hz), 128.9 (d, $J=13.4$ Hz), 128.9, 123.5, 115.5 (d, $J=21.5$ Hz), 80.3, 78.1, 69.2, 52.3, 25.7, 25.0; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{FNO}_6$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 402.1353, found 402.1355.

2-(4-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)丁氧基)-2-(3-氟苯基)乙酸甲酯(**4c**): 黄色油状, 36.1 mg, 产率 90%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.84~7.82 (m, 2H), 7.76~7.74 (m, 2H), 7.34~7.30 (m, 1H), 7.24~7.22 (m, 1H), 7.20~7.17 (m, 1H), 7.03~6.99 (m, 1H), 4.89 (s, 1H), 4.26~4.25 (m, 2H), 3.72 (s, 3H), 3.68~3.64 (m, 1H), 3.58~3.55 (m, 1H), 1.92~1.91 (m, 4H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 167.8, 163.6 (d, $J=246.1$ Hz), 162.8, 139.0 ($J=7.3$ Hz), 134.5, 130.2 (d, $J=8.1$ Hz), 128.9, 123.5, 122.7 (d, $J=3.0$ Hz), 115.5 (d, $J=21.0$ Hz), 114.1 (d, $J=22.4$ Hz), 80.3 ($J=1.7$ Hz), 78.1, 69.4, 52.4, 25.7, 24.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{FNO}_6$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 402.1353, found 402.1357.

2-(3-氯苯基)-2-(4-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)丁氧基)乙酸甲酯(**4d**): 黄色油状, 40.0 mg, 产率为 96%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.84~7.82 (m, 2H), 7.76~7.74 (m, 2H), 7.46 (s, 1H), 7.35~7.33 (m, 1H), 7.30~7.27 (m, 2H), 4.87 (s, 1H), 4.27~4.23 (m, 2H), 3.72 (s, 3H), 3.66~3.64 (m, 1H), 3.57~3.55 (m, 1H), 1.94~1.92 (m, 4H); ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ : 170.9, 163.6, 138.6, 134.5, 134.4, 129.9, 129.0, 128.8, 127.2, 125.2, 123.5, 80.3, 78.1, 69.4, 52.4, 25.7, 24.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{ClNO}_6$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 418.1057, found 418.1061.

2-(4-溴苯基)-2-(4-((1,3-二氧代异吡啶啉-2-基)氧基)丁氧基)乙酸甲酯(**4e**): 黄色油状, 44.2 mg, 产率 96%. ^1H

NMR (500 MHz, CDCl₃) δ : 7.84~7.82 (m, 2H), 7.76~7.74 (m, 2H), 7.49~7.47 (m, 2H), 7.34~7.32 (m, 2H), 4.85 (s, 1H), 4.24~4.23 (m, 2H), 3.71~3.70 (m, 3H), 3.66~3.62 (m, 1H), 3.55~3.53 (m, 1H), 1.90~1.89 (m, 4H); ¹³C NMR (125 MHz, CDCl₃) δ : 171.0, 163.6, 135.7, 134.5, 131.7, 129.0, 128.8, 123.5, 122.7, 80.3, 78.1, 69.3, 52.4, 25.7, 24.9; HRMS (ESI-TOP) calcd for C₂₁H₂₁BrNO₆ [M+H]⁺ 462.0552, found 462.0555.

2-(4-((1,3-二氧异噻啉-2-基)氧基)丁氧基)-2-苯乙酸苯乙酯(**4f**): 黄色油状, 44.1 mg, 产率 93%. ¹H NMR (500 MHz, CDCl₃) δ : 7.83~7.80 (m, 2H), 7.75~7.72 (m, 2H), 7.41~7.39 (m, 2H), 7.34~7.30 (m, 3H), 7.25~7.19 (m, 3H), 7.09~7.07 (m, 2H), 4.84 (s, 1H), 4.35~4.30 (m, 2H), 4.25~4.20 (m, 2H), 3.60~3.56 (m, 1H), 3.52~3.48 (m, 1H), 2.89~2.86 (m, 2H), 1.92~1.84 (m, 4H); ¹³C NMR (125 MHz, CDCl₃) δ : 170.9, 163.7, 137.5, 136.6, 134.4, 129.0, 128.9, 128.6, 128.5, 128.5, 127.2, 126.5, 123.5, 81.1, 78.1, 69.1, 65.5, 34.9, 25.7, 25.0; HRMS (ESI-TOP) calcd for C₂₈H₂₈NO₆ [M+H]⁺ 474.1917, found 474.1919.

辅助材料(Supporting Information) 化合物 **3a~4f** 的 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 图谱。这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载。

References

- [1] Diedrich, D.; Moita, A. J. R.; Rether, A.; Frieg, B.; Reiss, G. J.; Hoepfner, A.; Kurz, T.; Gohlke, H.; Ledeker, S.; Kassack, M. U.; Hansen, F. K. *Chem.-Eur. J.* **2016**, *22*, 17600.
- [2] Takekida, Y.; Okazaki, M.; Shuto, Y. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* **1999**, *63*, 1831.
- [3] Brown, M. F.; Mitton-Fry, M. J.; Arcari, J.; Barham, T.; Casavant, J. B.; Gerstenberger, S. S.; Han, J. *J. Med. Chem.* **2013**, *56*, 5541.
- [4] Yamawaki, K.; Nomura, T.; Yasukata, T.; Uotani, K.; Miwa, H.; Takeda, K.; Nishitani, Y. *Bioorg. Med. Chem.* **2007**, *15*, 6716.
- [5] Hara, R.; Nakai, E.-I.; Hisamichi, H.; Nagano, N. *J. Antibiot.* **1994**, *47*, 477.
- [6] Bompert, J.; Giral, L.; Malicorne, G.; Puygrenier, M. *Eur. J. Med. Chem.* **1988**, *23*, 457.
- [7] Szabo, G.; Fischer, J.; Kis-Varga, A.; Gyires, K. *J. Med. Chem.* **2008**, *51*, 142.
- [8] Edafiogho, I. O.; Scott, K. R.; Moore, J. A.; Farrar, V. A.; Nicholson, J. M. *J. Med. Chem.* **1991**, *34*, 387.
- [9] Dian, L.; Wang, S.; Zhang-Negregerie, D.; Du, Y. *Adv. Synth. Catal.* **2015**, *357*, 3836.
- [10] Krylov, I. B.; Lopat'eva, E. R.; Budnikov, A. S.; Nikishin, G. I.; Terent'ev, A. O. *J. Org. Chem.* **2020**, *85*, 1935.
- [11] Xu, L.; Yi, Y.; Hu, S.; Ye, J.; Hu, A. *Electrochim. Acta* **2022**, *403*, 139533.
- [12] Liu, L.; Zhang, J. *Chem. Soc. Rev.* **2016**, *45*, 506.
- [13] Ciszewski, L. W.; Rybicka-jasinska, K.; Gryko, D. *Org. Biomol. Chem.* **2019**, *17*, 432.
- [14] Li, Q.; Li, M.; Shi, S.; Ji, S.; He, C.; Jiang, B.; Hao, W. *Chin. J. Org. Chem.* **2020**, *40*, 384 (in Chinese).
(李庆雪, 李梦伟, 时绍青, 季晓霜, 何春兰, 姜波, 郝文娟, 有机化学, **2020**, *40*, 384.)
- [15] (a) Yang, Z.; Stivanin, M. L.; Jurberg, I. D.; Koenigs, R. M. *Chem. Soc. Rev.* **2020**, *49*, 6833.
(b) Sambasivanand, R.; Ball, Z. T. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2012**, *51*, 8568.
(c) Adly, F. G.; Gardiner, M. G.; Ghanem, A. *Chem.-Eur. J.* **2016**, *22*, 3447.
(d) Qin, C.; Boyarskikh, V.; Hansen, J. H.; Hardcastle, K. I.; Mutsaers, D. G.; Davies, H. M. L. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 19198.
(e) Xu, H.; Li, Y.-P.; Cai, Y.; Wang, G.-P.; Zhu, S. F.; Zhou, Q.-L. *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 7697.
- [16] (a) Padwa, A.; Weingarten, M. D. *Chem. Rev.* **1996**, *96*, 223.
(b) Yakura, T.; Ozono, A.; Matsui, K.; Yamashita, M.; Fujiwara, T. *Synlett* **2013**, *24*, 65.
(c) Roberts, E.; Sançon, J. P.; Sweeney, J. B. *Org. Lett.* **2005**, *7*, 2075.
- [17] (a) Clapham, B.; Spanka, C.; Janda, K. D. *Org. Lett.* **2001**, *3*, 2173.
(b) Tan, F.; Liu, X.; Hao, X.; Tang, Y.; Lin, L.; Feng, X. *ACS Catal.* **2016**, *6*, 6930.
(c) Zhang, Y.; Yao, Y.; He, L.; Liu, Y.; Shi, L. *Adv. Synth. Catal.* **2017**, *359*, 2754.
- [18] (a) Neupane, P.; Li, X.; Jung, J. H.; Lee, Y. R.; Kim, S. H. *Tetrahedron* **2012**, *68*, 2496.
(b) Dyer, J.; Jockusch, S.; Balsanek, V.; Sames, D.; Turro, N. *J. Org. Chem.* **2005**, *70*, 2143.
(c) Dussault, P. H.; Xu, C. *Tetrahedron Lett.* **2004**, *45*, 7455.
- [19] (a) Wang, N.-N.; Huang, L.-R.; Hao, W.-J.; Zhang, T.-S.; Li, G.; Tu, S.-J.; Jiang, B. *Org. Lett.* **2016**, *18*, 1298.
(b) Cheng, R.; Qi, C.; Wang, L.; Xiong, W.; Liu, H.; Jiang, H. *Green Chem.* **2020**, *22*, 4890.
(c) Qian, L.; Cai, B.-G.; Li, L.; Xuan, J. *Org. Lett.* **2021**, *23*, 6951.
(d) Cai, B.-G.; Li, Q.; Zhang, Q.; Li, L.; Xuan, J. *Org. Chem. Front.* **2021**, *8*, 598.
(e) Zhang, T.-S.; Zhang, H.; Fu, R.; Wang, J.; Hao, W.-J.; Tu, S.-J.; Jiang, B. *Chem. Commun.* **2019**, *55*, 13231.
- [20] Liu, R.; Liu, Q.; Meng, H.; Ding, H.; Hao, J.; Ji, Z.; Yue, H.; Wei, W. *Org. Chem. Front.* **2021**, *8*, 1970.
- [21] Yang, J.; Duan, J.; Wang, G.; Zhou, H.; Ma, B.; Wu, C.; Xiao, J. *Org. Lett.* **2020**, *22*, 7284.

(Cheng, F.)