高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

水相中烷基硫代酯的绿色合成

闫晓雨，陈钰莹，赵　媚，袁贻云，卞佳坤，马献涛
（信阳师范大学化学化工学院，信阳市绿色催化和合成重点实验室，信阳 464000）

摘要　发展了一种无需任何添加剂，在水相中合成烷基硫代酯的绿色方法．以卤代烃与硫代酰胺为原料，在水相中反应4 h，即可以较高收率得到预期产物，并可兼容多种官能团．与传统方法相比，该方法具有实验操作简单、反应绿色高效及原子经济等优点，并且可以实现克级制备，具有较高的应用价值．

关键词　硫酯；卤代烃；硫代酰胺；水相
中图分类号　O622.7　　**文献标志码**　A　　doi: 10.7503/cjcu20240006

Green Synthesis of Alkyl Thioesters in Water

YAN Xiaoyu, CHEN Yuying, ZHAO Mei, YUAN Yiyun, BIAN Jiakun, MA Xiantao*
(*College of Chemistry and Chemical Engineering, Green Catalysis & Synthesis Key Laboratory of Xinyang City, Xinyang Normal University, Xinyang* 464000, *China*)

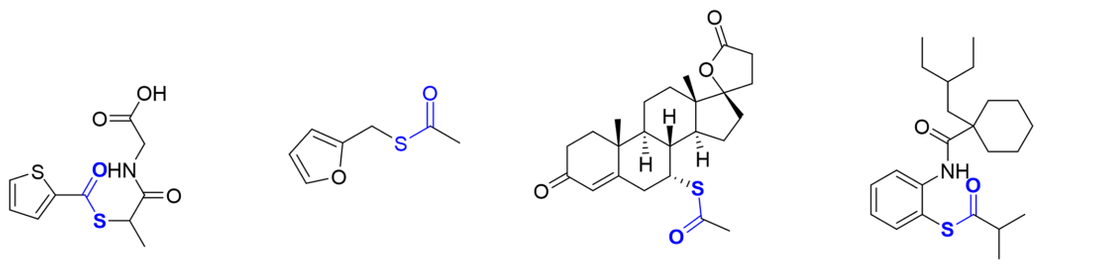
Abstract　A new, green and extra additive-free synthesis method of alkyl thioesters in water media was developed in this paper. By using alkyl halides and thioamide as the raw materials, the reaction can proceed smoothly in aqueous phase for 4 h, to afford the target thioester products with high yields, and the method can be compatible with various functional groups. Compared with the available methods, this method has the advantages of simple experimental operation, green and high efficiency, good atomic economy, and can easily be scaled up in gram scale, and has high practical application value.

Keywords　Thioester; Alkyl halide; Thioamide; Water media

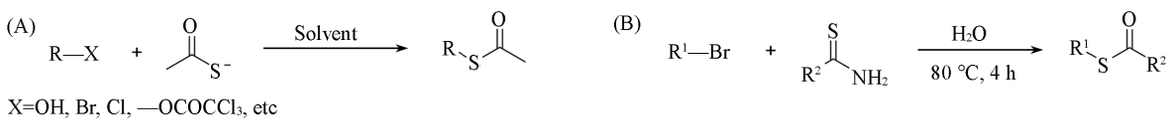
有机硫化合物是一类重要的有机化合物分子，常用于制造橡胶、纤维、染料、药物和农药等[1~3]．此外，有机硫化合物还是多种有机反应的关键中间体，常用作反应配体或手性助剂等[4~9]．烷基硫代酯是一类重要的有机硫化合物，是许多生理活性药物和天然产物的重要结构片段[10~12]，如口服活性祛痰剂司替罗宁(Stepronin)、食用香料(Furfuryl thioacetate)、保钾利尿剂螺内酯(Spironolactone)和信号转导途径激酶抑制剂(CETP抑制剂，Dalcetrapib)等(结构见Scheme 1)．因此，近年来，烷基硫代酯的合成受到了研究人员的广泛关注．

传统上，硫代酯通常通过硫代酸盐与卤代烷烃的亲核取代反应[Scheme 2(A)][13~18]以及硫醇与羧酸的酯化反应合成[19~23]．近年来，随着过渡金属催化偶联反应的快速发展，硫代酯也可通过芳基化试剂在过渡金属的催化下偶联制备[24~27]．在以上合成方法中，硫代酸盐与卤代烷烃发生亲核取代反应合成硫代酯的方法因具有实验操作简单、所需试剂廉价易得及反应结果稳定高效等优点而被广泛应用于

收稿日期: 2024-01-04. 网络首发日期: 2024-02-23.
联系人简介: 马献涛, 男, 博士, 副教授, 主要从事绿色合成方面的研究. E-mail: xiantaoma@126.com
基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22101243)、河南省本科高校青年骨干教师培养计划(批准号: 2023GGJS097)、信阳师范大学南湖学者青年项目和信阳师范大学研究生科研创新基金(批准号: 2022KYJJ013)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.22101243), the Young Backbone Teacher Training Objects of Colleges and Universities in Henan Province, China(No.2023GGJS097), the Nanhu Scholars Program for Young Scholars of Xinyang Normal University, China and the Graduate Research iInnovation Fund of Xinyang Normal University, China(No.2022KYJJ013).



Scheme 1　Representative thioester structures



Scheme 2　Synthesis of thioester from alkyl halide and thioacetic acid in common organic solvent(A) and H_2O(B)

实验室制备和化工生产中. 然而, 硫代酸盐一般具有恶臭气味, 且反应通常需要使用常规有机溶剂或者以硅胶作为载体进行阴离子活化[28,29], 这些缺点限制了其广泛应用. 因此, 仍亟待开发一种更为绿色的合成硫代酯的新方法. 与硫代酸盐相比, 硫代酰胺具有无味无臭、廉价易得等优点, 但是因其存在2个亲核位点(S和N), 故得到单一的S位点的取代产物仍存在挑战.

本课题组[30~33]长期致力于水相有机合成及有机硫的合成转化研究, 研究中发现卤代烷烃与硫代酰胺在水相中无需任何添加剂, 即可以较高产率得到单一取代的"S"烷基化产物[Scheme 2(B)]. 与传统方法相比, 卤代烷烃与硫代酰胺在水相中直接制备硫酯的方法避免了有毒溶剂的使用、反应温和高效、选择性高、可以实现克级放大, 具有较高的应用价值.

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

苄溴、4-甲基溴苄、4-氟溴苄、4-氯溴苄、4-氰基溴苄、4-硝基溴苄、2-氟溴苄、2-溴溴苄、2-碘溴苄、2-硝基溴苄、3-氟溴苄、3-溴溴苄、3-硝基溴苄、肉桂基溴、2-(溴甲基)萘、2,6-双(溴甲基)萘、溴己烷、溴壬烷、溴十二烷、硫代乙酰胺和四丁基碘化铵, 分析纯, 安耐吉萨恩化学技术有限公司; 2,6-二甲基苄基溴、2,6-二氯苄基溴和硫代苯甲酰胺, 分析纯, 上海毕得医药科技股份有限公司; 四氢呋喃(THF)、1,4-二氧六环(Dioxane)、氯仿($CHCl_3$)、甲苯(Toluene)、乙酸乙酯(EA)、乙腈(MeCN)和乙醇(EtOH), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司

Agilent GC-MS-5890A/5975C Plus spectrometer(EI)型气相色谱-质谱联用仪(GC-MS), 美国安捷伦公司; JNM-ECZ600R/S3 型核磁共振波谱仪(NMR), 日本电子株式会社; Xevo G2-XS Qtof(ESI或EI)型超高效液相色谱-高分辨质谱联用仪(HRMS), 美国沃特世公司; 薄层色谱仪(TLC), 烟台江友硅胶开发有限公司.

1.2　实验过程

以苄溴与硫代乙酰胺反应合成了硫代乙酸苄酯(**3**aa). 依次向10 mL反应管内加入59.4 μL(0.5 mmol)苄溴、45.1 mg(0.6 mmol)硫代乙酰胺和0.2 mL H_2O, 于80 ℃搅拌反应4 h, 用TLC/GC-MS监测至反应完全. 用EA萃取反应混合液, 有机相经柱层析($V_{乙酸乙酯}$∶$V_{石油醚}$=0∶100~1∶5)洗脱, 旋转蒸干溶剂得到化合物**3**aa.

采用相同方法, 用其它卤化物代替苄溴, 对反应底物的电子与位阻效应进行考察, 合成了化合物**3**ab~**3**av和**3**ba, 其核磁共振氢谱和碳谱图及数据见图S1~图S49(见本文支持信息)和表1.

Table 1 ^{1}H NMR and ^{13}C NMR data of compounds 3aa—3av and 3ba

Compd.	^{1}H NMR(600 MHz, $CDCl_3$), δ	^{13}C NMR(150 MHz, $CDCl_3$), δ
3aa	7.32—7.27(m, 4H), 7.27—7.23(m, 1H), 4.12(s, 2H), 2.35(s, 3H)	195.3, 137.7, 128.9, 128.7, 127.4, 33.5, 30.4
3ab	7.18(d, *J*=8.4 Hz, 2H), 7.10(d, *J*=7.8 Hz, 2H), 4.09(s, 2H), 2.34(s, 3H), 2.32(s, 3H)	195.4, 137.1, 134.6, 129.4, 128.8, 33.3, 30.5, 21.2
3ac[a]	7.30—7.21(m, 2H), 7.03—6.93(m, 2H), 4.08(s, 2H), 2.34(s, 3H)	195.2(s), 162.1(d, *J*=245.8 Hz), 133.6(d, *J*=2.7 Hz), 130.5(d, *J*=7.7 Hz), 115.6(d, *J*=21.6 Hz), 32.8(s), 30.5(s)
3ad	7.28—7.25(m, 2H), 7.24—7.21(m, 2H), 4.07(s, 2H), 2.35(s, 3H)	195.2, 136.4, 133.2, 130.3, 128.8, 32.8, 30.5
3ae	7.59(d, *J*=8.4 Hz, 2H), 7.40(d, *J*=8.4 Hz, 2H), 4.12(s, 2H), 2.37(s, 3H)	194.6, 143.6, 132.5, 132.4, 129.7, 129.6, 118.8, 111.2, 33.1, 30.4
3af[b]	8.18—8.12(m, 2H), 7.49—7.45(m, 2H), 4.16(s, 2H), 2.37(s, 3H)	194.5, 147.1, 145.6, 129.8, 123.9, 32.8, 30.4
3ag[c]	7.37(td, *J*=7.8, 1.8 Hz, 1H), 7.26—7.21(m, 1H), 7.07(td, *J*=7.8, 0.6 Hz, 1H), 7.03(t, *J*=9.6 Hz, 1H), 4.15(s, 2H), 2.35(s, 3H)	195.1(s), 160.9(d, *J* = 247.1 Hz), 131.2(d, *J*=3.8 Hz), 129.3(d, *J*=8.2 Hz), 124.8(d, *J*=15.4 Hz), 124.3(d, *J*=3.7 Hz), 115.5(d, *J*=21.5 Hz), 30.4(s), 26.8(s)
3ah	7.58—7.51(m, 1H), 7.45(dd, *J*=7.8, 1.8 Hz, 1H), 7.29—7.19(m, 1H), 7.12(td, *J*=7.8, 1.8 Hz, 1H), 4.24(s, 2H), 2.34(s, 3H)	195.1, 137.3, 132.9, 131.3, 129.1, 127.8, 124.6, 34.1, 30.4
3ai	7.83(d, *J*=7.8 Hz, 1H), 7.45(d, *J*=7.8 Hz, 1H), 7.28(dd, *J*=14.4, 7.2 Hz, 1H), 6.94(t, *J*=7.8 Hz, 1H), 4.23(s, 2H), 2.35(s, 3H)	195.0, 140.5, 139.6, 130.7, 129.2, 128.7, 100.6, 38.8, 30.5
3aj[d]	8.04(dd, *J*=8.4, 1.2 Hz, 1H), 7.64(dd, *J*=7.8, 1.2 Hz, 1H), 7.57(td, *J*=7.8, 1.2 Hz, 1H), 7.47—7.40(m, 1H), 4.42(s, 2H), 2.33(s, 3H)	195.3, 148.1, 133.9, 133.8, 132.8, 128.7, 125.3, 31.1, 30.3
3ak[e]	7.29—7.22(m, 1H), 7.06(d, *J*=7.2 Hz, 1H), 7.02—6.98(m, 1H), 6.96—6.91(m, 1H), 4.10(s, 2H), 2.36(s, 3H)	195.0(s), 162.9(d, *J*=245.9 Hz), 140.3(d, *J*=7.4 Hz), 130.2(d, *J*=8.5 Hz), 124.5(d, *J*=2.2 Hz), 115.8(d, *J*=21.9 Hz), 114.3(d, *J*=20.7 Hz), 33.0(s), 30.4(s)
3al	7.44(t, *J*=1.8 Hz, 1H), 7.40—7.35(m, 1H), 7.24—7.19(m, 1H), 7.16(t, *J*=7.8 Hz, 1H), 4.07(s, 2H), 2.36(s, 3H)	194.9, 140.1, 131.9, 130.5, 130.2, 127.6, 122.6, 32.9, 30.4
3am[f]	8.16(t, *J*=1.8 Hz, 1H), 8.13—8.08(m, 1H), 7.65(d, *J*=7.8 Hz, 1H), 7.48(t, *J*=7.8 Hz, 1H), 4.18(s, 2H), 2.38(s, 3H)	194.5, 148.4, 140.2, 135.1, 129.6, 123.8, 122.4, 32.7, 30.4
3an	7.37—7.33(m, 2H), 7.32—7.27(m, 2H), 7.24—7.21(m, 1H), 6.56(d, *J*=15.6 Hz, 1H), 6.23—6.12(m, 1H), 3.70(dd, *J*=7.8, 1.2 Hz, 2H), 2.36(s, 3H)	195.4, 136.6, 133.2, 128.7, 127.8, 126.5, 124.5, 31.9, 30.7
3ao	7.83—7.74(m, 4H), 7.50—7.43(m, 2H), 7.38(d, *J*=8.4 Hz, 1H), 4.28(s, 2H), 2.37(s, 3H)	195.3, 135.1, 133.4, 132.6, 128.6, 127.8, 127.8, 127.6, 127.0, 126.4, 126.0, 33.8, 30.5
3ap	7.74—7.70(m, 4H), 7.40—7.33(m, 2H), 4.26(s, 4H), 2.36(s, 6H)	195.2, 135.2, 132.5, 128.4, 127.4, 127.4, 33.8, 30.5
3aq[g]	7.09—7.05(m, 1H), 7.01(d, *J*=7.2 Hz, 2H), 4.20(s, 2H), 2.36(s, 3H), 2.33(s, 6H)	196.3, 137.4, 132.5, 128.4, 127.5, 30.5, 28.7, 20.0
3ar[h]	7.30(d, *J*=8.4 Hz, 2H), 7.15(dd, *J*=10.2, 5.4 Hz, 1H), 4.49(s, 2H), 2.37(s, 3H)	194.7, 136.0, 132.9, 129.2, 128.4, 30.3, 29.6
3as	7.33(s, 1H), 6.29(s, 1H), 6.22(d, *J*=3.0 Hz, 1H), 4.15(s, 2H), 2.35(s, 3H)	194.7, 150.5, 142.3, 110.7, 108.0, 30.5, 26.0
3at	2.86(t, *J*=7.8 Hz, 2H), 2.33(s, 3H), 1.60—1.53(m, 2H), 1.40—1.33(m, 2H), 1.32—1.24(m, 4H), 0.88(t, *J*=6.6 Hz, 3H)	196.1, 31.4, 30.7, 29.6, 29.2, 28.6, 22.6, 14.1
3au	2.86(t, *J*=7.2 Hz, 2H), 2.33(s, 3H), 1.59—1.52(m, 2H), 1.39—1.32(m, 2H), 1.31—1.22(m, 10H), 0.88(t, *J*=7.2 Hz, 3H)	196.3, 32.0, 30.8, 29.6, 29.5, 29.3, 29.3, 29.2, 28.9, 22.8, 14.2
3av	2.86(t, *J*=7.2 Hz, 2H), 2.33(s, 3H), 1.58—1.53(m, 2H), 1.38—1.32(m, 2H), 1.31—1.22(m, 18H), 0.88(t, *J*=7.2 Hz, 3H)	196.3, 32.0, 30.8, 29.7, 29.7, 29.6, 29.5, 29.3, 29.2, 28.9, 22.8, 14.2

Continued

Compd.	^{1}H NMR(600 MHz, $CDCl_3$), δ	^{13}C NMR(150 MHz, $CDCl_3$), δ
3ba	7.96(dd, *J*=8.4, 1.2 Hz, 2H), 7.57—7.53(m, 1H), 7.45—7.40(m, 2H), 7.37(d, *J*=7.2 Hz, 2H), 7.34—7.29(m, 2H), 7.26—7.22(m, 1H), 4.31(s, 2H)	191.4, 137.6, 136.9, 133.6, 129.1, 128.8, 128.8, 128.6, 127.5, 127.4, 33.5

a. ^{19}F NMR(564 MHz, $CDCl_3$): δ −115.0; *b*. HRMS(ESI) for $C_9H_{10}NO_3S$(M+H), Calcd.: *m/z* 212.0381; found: *m/z* 212.0385; *c*. ^{19}F NMR(564 MHz, $CDCl_3$): δ −116.9; *d*. HRMS(ESI) for $C_9H_{10}NO_3S$(M+H), Calcd.: *m/z* 212.0381; found: *m/z* 212.0384; *e*. ^{19}F NMR(564 MHz, $CDCl_3$): δ −112.8; *f*. ^{19}F NMR(564 MHz, $CDCl_3$): −112.8; *g*. HRMS(ESI) for $C_{11}H_{15}OS$(M+H), Calcd.: *m/z* 195.0844; found: *m/z* 195.0841; *h*. HRMS(ESI) for $C_9H_9Cl_2OS$(M+H), Calcd.: *m/z* 234.9751; found: *m/z* 234.9756.

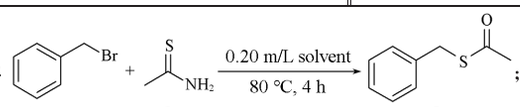
2 结果与讨论

2.1 反应条件的优化

以苄溴(**1**a)与硫代乙酰胺(**2**a)作为模型底物对反应条件进行了优化. 由表2可见, 以水作为溶剂时, 在80 ℃下反应4 h, 即可以85%的收率得到目标产物**3**aa(表2中Entry 1); 以乙醇作为溶剂时, 收率下降至31%; 以四氢呋喃、乙腈、1,4-二氧六环、氯仿和甲苯等作为溶剂时, 均未得到目标产物**3**aa. 当增加水的用量使反应浓度为0.1 mol/L时, 产率下降至28%; 以乙醇作溶剂, 增添1或2 mmol的水时, 与不添加水相比, 反应收率明显提升, 表明水对反应起到重要作用(表2中Entries 2~7, 10和11). 当降低反应温度时, 反应不能彻底进行, 化合物**3**aa的收率明显降低; 而升高温度至100 ℃时, 并无较大促进作用(表2中Entries 8和9), 最终选择80 ℃作为最优反应温度.

Table 2 Condition screening for the water-promoted synthesis of benzylthioacetate[a]

Entry	Solvent	Yield(%)[b]	Entry	Solvent	Yield(%)[b]	Entry	Solvent	Yield(%)[b]
1	H_2O	85	5	Dioxane	0	9[d]	H_2O	85
2	EtOH	31	6	$CHCl_3$	0	10[e]	H_2O	28
3	THF	0	7	Toluene	0	11[f]	EtOH	46/54
4	MeCN	0	8[c]	H_2O	77			

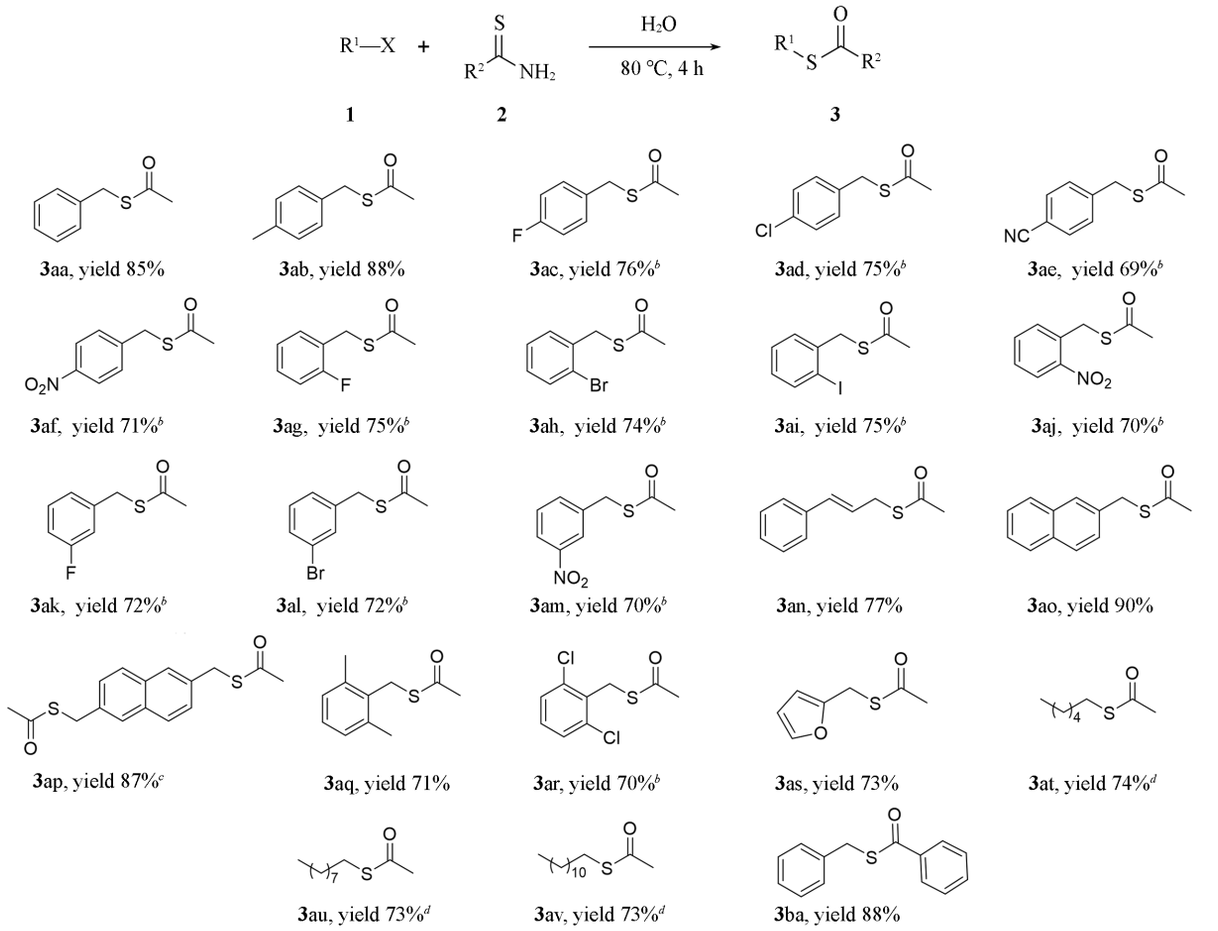
a. 

1a **2**a **3**aa; unless otherwise noted, a mixture of benzyl bromide(**1**a, 0.50 mmol), (**2**a, 0.60 mmol) and a solvent(0.2 mL) was stirred in a 10 mL tube at 80 ℃ for 4 h, then the mixture was monitored by GC-MS/TLC; *b*. isolated yield based on compound **2**a; *c*. 50 ℃; *d*. 100 ℃; *e*. reaction concentration: 0.1 mol/L; *f*. add 1 or 2 mmol H_2O.

2.2 反应底物的拓展

将优化的反应条件用于各种类型的卤代烷烃与硫代酰胺的反应, 结果列于Scheme 3. 可见, 无论苯环上含有供电子基—CH_3, 还是吸电子基—F, —Cl, —Br和—I, 甚至强吸电子基—CN和—NO_2时, 均可以中等至优秀的收率得到预期产物**3**aa~**3**am. 值得指出的是, 位阻效应对该反应体系影响不大, 如苯环邻、间、对不同位置均为—F和—NO_2, 且两边邻位均有取代基时, 反应收率几乎不受影响(化合物**3**ac, **3**ag和**3**ak; **3**af, **3**aj和**3**am; 3aq和**3**ar); 该方法还可以扩展到肉桂基溴和稠环芳香卤代烃, 以中等至优秀的收率得到预期产物**3**an~**3**ao; 对于二卤取代的烷烃, 如二取代的萘甲基溴化合物, 将硫代乙酰胺的量加倍, 也可以较高收率得到二取代的硫代酯化合物**3**ap; 令人惊喜的是, 还可以较高收率扩展合成食品香料**3**as; 对于脂肪族卤代烃, 在标准条件下仅能得到少量预期硫代酯产物; 当使用50%(摩尔分数)的四丁基碘化铵作为添加剂以增强卤代烃亲电性, 反应温度升高至100 ℃, 反应24 h时, 也可以较高收率得到目标产物**3**at~**3**av. 该方法也适用于其它类型的硫代酰胺, 如硫代苯甲酰胺, 可以较高收率得到预期产物**3**ba.

将10 mmol苄溴、12 mmol硫代乙酰胺和2 mL水于80 ℃反应4 h, 得到1.3489 g化合物**3**aa, 产率为81%, 表明新方法可以实现硫代酯**3**aa的克级制备.

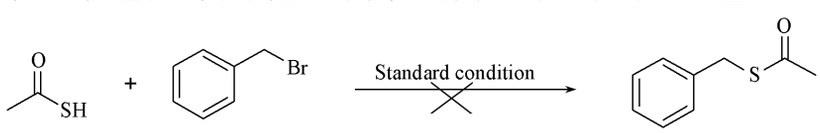


Scheme 3　Substrate extension for the water-promoted synthesis of thioester

a. Unless otherwise noted, see Table 2, Entry 1 for details, isolated by column chromatography; *b*. 80 ℃, 8 h; *c*. benzyl bromide (**1**a, 0.50 mmol), thioacetamide(**2**a, 1.20 mmol); *d*. add tetrabutylammonium iodide(50%, molar fraction), 100 ℃.

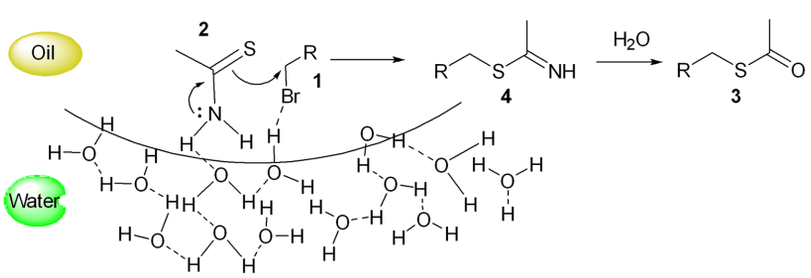
2.3　反应机理

对反应机理进行了初步研究，推测硫代酰胺有可能先水解成硫代酸，硫代酸进一步与卤代烃反应得到预期产物**3**aa，对照实验表明，硫代乙酸与苄溴在标准条件下并未发生反应(Scheme 4).



Scheme 4　Control experiment

根据实验结果和文献[33,34]报道，推测了该反应的机理. 如Scheme 5所示，由于水可以与N形成氢键，N的孤对电子对迁移增强了C═S中S的亲核性，而氢键作用力进一步拉近了卤代烃(**1**)与硫代酰胺(**2**)的空间距离，同时进一步增强了硫代乙酰胺(**2**)中S的亲核性，进而使得反应能够在较温和的条件下高效地生成中间体**4**，中间体**4**进一步水解得到目标产物**3**.



Scheme 5　Possible reaction mechanism

3 结　论

发展了一种无需任何添加剂，在水相体系中合成烷基硫代酯的新方法．该方法可以兼容氟、氯、溴、碘、硝基、氰基及烯基等取代的各种芳基卤代烷烃，且可以拓展到脂肪链卤代烃、稠环芳香卤代烃和二取代卤代烃等，展现出良好的底物范围．新方法操作简单、绿色高效，同时可以避免有毒溶剂的使用，具有较高的实际应用价值．

支持信息见 http: //www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20240006.

参　考　文　献

[1] Montanari S., Paradisi C., Scorrano G., *J. Org. Chem.*, **1993**, *58*(21), 5628—5631
[2] Fontecave M., Ollagnier-de-Choudens S., Mulliez E., *Chem. Rev.*, **2003**, *103*(6), 2149—2166
[3] Barattucci A., Di Gioia M. L., Leggio A., Minuti L., Papalia T., Siciliano C., Temperini A., Bonaccorsi P., *Eur. J. Org. Chem.*, **2014**, *2014*(10), 2099—2104
[4] Burt L. K., Hill A. F., Jones S. L., *Chem. Commun.*, **2022**, *58*(79), 11091—11094
[5] Guo J. R., Huang H. Y., Yan Y. L., Liang C. F., *Asian J. Org. Chem.*, **2018**, *7*(1), 179—188
[6] Matczak P., Kupfer S., Mlostoń G., Buday P., Görlsd H., Weigand W., *New J. Chem.*, **2022**, *46*(27), 12924—12933
[7] Otocka S., Kwiatkowska M., Madalińska L., Kiełbasiński P., *Chem. Rev.*, **2017**, *117*(5), 4147—4181
[8] Bellemin-Laponnaz S., Achard T., *Synthesis*, **2023**, *55*, doi: 10.1055/a-2193-4927
[9] Li R. P., Barel N., Subramaniyan V., Tibika F., Hoffman R., Tulchinsky Y., *Organometallics*, **2023**, *42*(3), 246—258
[10] Huber W. W., Parzefall W., *Curr. Opin. Pharmacol.*, **2007**, *7*(4), 404—409
[11] Api A. M., Belsito D., Biserta S., Botelho D., Bruze M., Burton G. A., Buschmann J., Cancellieri M. A., Dagli M.L., Date M., Dekant W., Deodhar C., Fryer A. D., Gadhia S., Jones L., Joshi K., Lapczynski A., Lavelle M., Liebler D. C., Na M., O'Brien D., Patel A., Penning T. M., Ritacco G., Rodriguez-Ropero F., Romine J., Sadekar N., Salvito D., Schultz T. W., Siddiqi F., Sipes I. G., Sullivan G., Thakkar Y., Tokura Y., Tsang S., *Food Chem. Toxicol.*, **2020**, *144*, 111615
[12] Dawson P. E., Kent S. B. H, , *Annu. Rev. Biochem.*, **2000**, *69*, 923—960
[13] Aoyama T., Takido T., Kodomari M., *Synthetic Commun.*, **2003**, *33*(21), 3817—3824
[14] Wager K. M., Daniels M. H., *Org. Lett.*, **2011**, *13*(15), 4052—4055
[15] Kotha S., Gupta N. K., Ansari S., *RSC Adv.*, **2022**, *12*(39), 25154—25162
[16] Sohn C. H., Chung C. K., Yin S., Ramachandran P., Loo J. A., Beauchamp J. L., *J. Am. Chem. Soc.*, **2009**, *131*(15), 5444—5459
[17] Wang N., Saidhareddy P., Jiang X. F., *Nat. Prod. Rep.*, **2020**, *37*(2), 246—275
[18] Wang M., Jiang X. F., *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2022**, *10*(2), 671—677
[19] Iranpoor N., Firouzabadi H., Davan E. E., *Tetrahedron Lett.*, **2013**, *54*(14), 1813—1816
[20] Xuan M. J., Lu C. L., Liu M. N., Lin B. L., *J. Org. Chem.*, **2019**, *84*(12), 7694—7701
[21] Singh P., Peddinti R. K., *J. Chem. Sci.*, **2021**, *133*(1), 20
[22] Chai T. J., Chiou X. S., Lin N. X., Kuo Y. T., Lin C. K., *Org. Biomol. Chem.*, **2023**, *21*(37), 7541—7545
[23] Basu B., Paul S., Nanda A. K., *Green Chem.*, **2010**, *12*(5), 767—771
[24] Shen Z. K., Huo Y. W., Qi X. X., Wu X. F., *Org. Lett.*, **2023**, *25*(22), 4140—4144
[25] Xie Q. M., Wei A. H., Liu Z. D., Yan Q., Zhang X. L., Gao B., *Org. Lett.*, **2023**, *25*(38), 7035—7039
[26] Qi X. X., Bao Z. P., Yao X. T., Wu X. F., *Org. Lett.*, **2020**, *22*(16), 6671—6676
[27] Ito R., Okura Y., Nakada M., *Synlett*, **2023**, *34*(19), 2319—2322
[28] Mahou R., Wandrey C., *Polymers*, **2012**, *4*(1), 561—589
[29] Yang H. W., Choi J. S., Lee S. J., Yoo B. W., Yoon C. M., *J. Sulfur Chem.*, **2016**, *37*(2), 134—140
[30] Ma X. T., Yu J., Han C. J., Zhou Q. J., Ren M. J., Li L. X., Tang L., *Adv. Synth. Catal.*, **2019**, *361*(5), 1023—1027
[31] Ma X. T., Yu J., Zhou Q. J., Yan R., Zheng L. Y., Wang L. L., *J. Org. Chem.*, **2019**, *84*(11), 7468—7473
[32] Ma X. T., Zhu Y. Y., Yu J., Yan R., Xie X. N., Huang L. J., Wang Q., Chang X. P., Xu Q., *Org. Chem. Front.*, **2022**, *9*(12), 3204—3214
[33] Ma X. T., Yan X. Y., Zhu Y. Y., Niu S. L., Wang Y. X., Yuan C., *Chin. J. Org. Chem.*, **2023**, *43*(6), 2136—2142(马献涛, 闫晓雨, 朱影影, 牛双林, 王喻璇, 袁超. 有机化学, **2023**, *43*(6), 2136—2142)
[34] Walter W., Krohn J., *Justus Liebigs Annalen Der Chemie*, **1973**, 443—461

(Ed.: L, W, K)