

基于Lewis酸-碱作用合成“看得见”的B←N键配位化合物在实验教学中的设计与探索

刘亚茹, 贾玉娆, 徐兰, 张盛*, 姚霖斌

海南大学理学院, 海口 570228

摘要: 以缺电子硼(B)以及可以给出电子对的氮(N)为设计出发点, 基于聚集诱导发光(AIE)原理选择B与N的有机载体, 采用环保、节约、方便的“一锅法”, 合成化合物晶体, 表征结构, 通过配体的变化调节化合物光学性质“有无”“颜色”“强弱”变化, 体会结构决定性质的思想, 真正感受到“看得见, 摸得着”的化学理论。

关键词: 路易斯酸碱理论; 聚集诱导发光(AIE)原理; 榫卯结构; 硼(B); 氮(N)

中图分类号: G64; O6

Designing and Exploring “Visible” B←N Bond Coordination Compounds Based on Lewis Acid-Base Interaction in Laboratory Teaching

Yaru Liu, Yurao Jia, Lan Xu, Sheng Zhang*, Linbin Yao

School of Science, Hainan University, Haikou 570228, China.

Abstract: In this experiment, the electron-deficient boron and the electron-donating nitrogen were used as the starting points of the rational design. Furthermore, organic carriers of B and N were selected based on the principle of aggregation-induced emission (AIE). An environmentally friendly, economic and convenient “one-pot” synthesis method was employed to obtain crystal compounds, and the structures of these compounds were characterized. The optical properties of compounds, including “presence or absence”, “color”, and “strength”, were regulated by changing ligands. Students will understand the idea that the structure determines properties and will experience the visible and tangible chemical theories.

Key Words: Lewis acid-base theory; Aggregation-induced emission; Tenon and mortise structure; Boron; Nitrogen

酸碱理论是化学变化中应用最广的概念之一, 它包括酸碱电离理论、酸碱溶剂理论、酸碱质子理论以及酸碱电子理论^[1-3]。化学涉及许多酸碱反应, 熟悉酸碱理论对理解反应机理具有重要作用。其中, 路易斯酸碱理论范围非常广泛^[4](图1a), 结合亲电、亲核概念, 是本科无机化学、有机化学课程重要的知识点之一, 也是学习反应机理必须掌握的基础概念。

1923年, 美国化学家路易斯提出更广泛的酸碱理论, 旨在讨论有机反应催化机理以及溶液中的酸碱平衡和配位平衡等问题。酸: 一切能接受电子对的物质, 碱: 一切能给出电子对的物质。酸碱

收稿: 2022-10-10; 录用: 2022-12-11; 网络发表: 2023-03-01

*通讯作者, Email: zhangsheng19890501@163.com

基金资助: 海南省高等学校教育教学改革研究资助项目(Hnjg2022-29); 海南大学教育教学改革研究项目(hdjy2222); 海南省自然科学基金青年基金项目(222QN223); 海南大学科研启动项目(KYQD(ZR)21141); 国家自然科学基金青年基金项目(21703002)

反应的实质是碱提供电子对,与酸形成配位键而生成酸碱配合物。碱又叫做亲核试剂,酸又叫做亲电试剂。这一理论很好地解释了一些不能释放出质子的物质也是酸;一些没有接受质子的物质也是碱。路易斯酸碱给出了接受电子对以及给出电子的能力,通过空轨道与电子对的结合形成化合物,这种结合方式类似于我们国家传统建筑的榫卯结合方式^[5],榫卯是在两个木构件上所采用的一种凹凸结合的连接方式(图1b)。凸出部分叫榫(或榫头),相当于电子对;凹进部分叫卯(或榫眼、榫槽),相当于空轨道,榫和卯咬合,起到连接作用,形成稳定结合力,比如具有榫卯结构的“东方之冠”(图1c),极大地展现了中国古人的智慧,是我们中国人文化自信的底气。对于这一块内容的学习,无论是基础知识储备还是思政教育都显得意义深远。无机化学与有机化学是化学类专业本科生必修的专业基础课,路易斯酸碱理论学习之后,利用问卷星对本校2020与2021级应用化学与材料科学与工程专业的学生(420人)进行了学习效果调查,评判标准依据的是工程教育认证工作中对毕业要求的间接达成度评价,采用的方法为问卷调查法(表1)。本专业设定0.75作为间接达成度“达成”的评价标准,即 ≥ 0.75 结论为“达成”。根据表2中统计结果,78% (0.78)以上的人选择了AB选项,学生对路易斯酸碱知识点以及思政教育的评价刚好达到课程效果要求,但仍然需要提高。此外,通过问卷调查细节分析(表1与表2),同学们对于概念类知识掌握不够,并与其他酸碱理论混淆,针对这一现状,我们提出通过创新实验设计本科教学实验新方案,来提高本科生理论联系实际的能力、基础知识掌握程度以及思政教育契合度。



图1 (a) 路易斯酸碱反应; (b) 榫卯结构; (c) 中国馆“东方之冠”

表1 2020、2021级应用化学(210人)与材料科学与工程专业(210人)问卷调查

问卷题目	选项			
	A	B	C	D
1. 你了解酸碱理论吗?	非常	比较	一般	不了解
2. 你了解路易斯酸碱理论吗?	非常	比较	一般	不了解
3. 你能区分酸碱电离理论、酸碱溶剂理论、酸碱质子理论以及酸碱电子理论?	非常	比较	一般	不能
4. 你对路易斯酸碱理论的应用领域了解吗?	非常	比较	一般	不了解
5. 你觉得路易斯酸碱理论重要吗?	非常	比较	一般	不重要
6. 你对空轨道、电子对概念了解吗?	非常	比较	一般	不了解
7. 你对设计实验并验证基础理论感不感兴趣?	非常	比较	一般	不感兴趣
8. 你对亲电、亲核概念了解吗?	非常	比较	一般	不了解
9. 你对“榫卯结构”了解吗?	非常	比较	一般	不了解
10. 你觉得基础知识重要吗?	非常	比较	一般	不重要
11. 你对“文化自信”了解吗?	非常	比较	一般	不了解
12. 你在化学知识学习中了解或者体会到民族自豪感吗?	非常	比较	一般	没有
13. 你对“绿水青山就是金山银山”“绿色发展和绿色生活”这些保护生态的理念了解吗?	非常	比较	一般	不了解
14. 你对理论联系实际的方法了解吗?	非常	比较	一般	没有

表2 问卷调查结果统计*

题号	选A人数	选A比例	选B人数	选B比例	选C人数	选C比例	选D人数	选D比例
1	256	60.95%	95	22.62%	43	10.24%	26	6.19%
2	167	39.76%	166	39.52%	61	14.52%	26	6.19%
3	233	55.48%	128	30.48%	64	15.24%	12	2.86%
4	302	71.90%	50	11.90%	10	2.38%	58	13.81%
5	200	47.62%	156	37.14%	44	10.48%	20	4.76%
6	218	51.90%	136	32.38%	34	8.10%	32	7.62%
7	240	57.14%	100	23.81%	80	19.05%	0	0.00%
8	288	68.57%	64	15.24%	52	12.38%	16	3.81%
9	142	33.81%	204	48.57%	68	16.19%	39	9.29%
10	257	61.19%	84	20.00%	25	5.95%	54	12.86%
11	203	48.33%	144	34.26%	24	5.71%	49	11.67%
12	40	9.52%	20	4.76%	360	85.71%	0	0.00%
13	136	32.38%	210	50.00%	44	10.48%	30	7.14%
14	160	38.10%	180	42.86%	60	14.28%	20	4.76%

*班级人数: 420; 参与问卷人数: 420

本实验以缺电子硼元素(B)和可给出电子对的氮元素(N)为出发点, 基于聚集诱导发光(AIE)原理选择B与N的有机载体^[6-8], 通过环保节约的“一锅法”, 避免回流操作, 缩短反应时间, 得到目标化合物晶体, 表征结构, 通过配体变化调节化合物光学性质, 体会结构决定性质的思想, 感受无机化学与有机化学中的“创造”和“控制”之美。同时在这个过程中, 学生学习diamond绘图软件以及origin数据处理软件, 分析结构与数据, 让学生能够真切感受到“看得见, 摸得着”的基础理论。同时教师在讲授中可穿插具有中国特色的“榫卯结构”以及具有“中国标签”的AIE理论, 最大程度地增强思政贴合度, 加强思政薄弱环节, 使思政教育更具针对性、科学性和成效性。

1 实验部分

1.1 实验原理

1.1.1 反应原理

路易斯酸碱理论, 通过空轨道与电子对结合形成化合物。N载体配体为碱, 为亲核试剂; B载体配体为酸, 为亲电试剂, 酸-碱作用得到B←N键配位化合物。

如图2, 在1,4-二氧六环(1,4-Dioxane)、甲醇(CH₃OH)和N,N-二甲基甲酰胺(DMF)的溶剂环境下, 四苯基硼酸钠(NaB(C₆H₅)₄)和三氟甲烷磺酸镝(Dy(O₃SCF₃)₃)会因为硼原子和正三价镝离子配位能力的差异而使得四苯基硼酸负离子的一个负一价的苯基配体从硼原子的配位点脱离并进入正三价镝离子的配位点, 形成电中性的三苯基硼烷(B(C₆H₅)₃)和负一价的一苯基三氟甲烷磺酸镝离子(Dy(C₆H₅)(O₃SCF₃)₃)⁻; 在电中性的三苯基硼烷形成之后, 根据“路易斯酸碱理论”, 4,4'-联吡啶(4,4'-bipy)上拥有孤对电子的氮原子可作为“路易斯碱”进攻三苯基硼烷的硼原子, 从而形成一类“桥接”着两个三苯基硼烷分子的4,4'-联吡啶衍生物((C₆H₅)₃B(bipy)B(C₆H₅)₃)。另外, 通过更换同系列的4,4'-联吡啶, 可以获得不同的联吡啶类衍生物。

1.1.2 发光原理

“聚集诱导发光”(Aggregation Induced Emission, AIE)在唐本忠院士的开创和引领下, 已成为科研领域的热点方向^[9]。AIE分子通常由外围的“转子”与中心的“定子”组成。在分散状态下, 外

围“转子”可以通过单键环绕中心自由旋转，这个过程以非辐射的形式消耗了激发态的能量，导致荧光减弱甚至不发光。而在聚集状态下，AIE分子的“螺旋桨”式的构型可以防止 $\pi-\pi$ 堆积，抑制荧光淬灭；同时由于空间限制，AIE分子内旋受到很大阻碍，从而抑制激发态的非辐射衰变渠道，打开了辐射衰变渠道，使荧光增强。

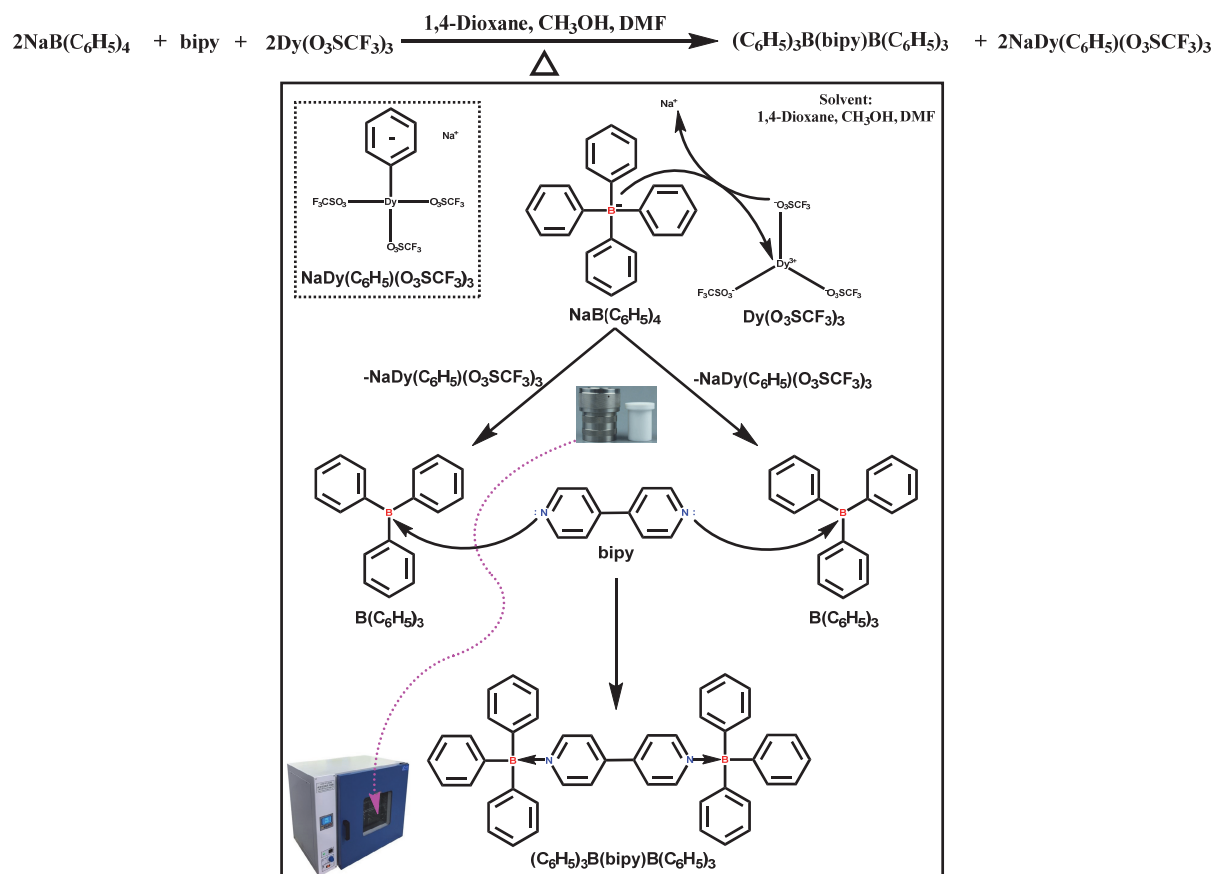


图2 “双硼烷”联吡啉衍生物形成的可能机理

1.2 试剂或材料

实验中所用的试剂及材料列于表3中。

表3 试剂或材料

试剂名称	纯度/%	制造商	CAS	规格/g	价格/元	保存方法
4,4'-联吡啶(L _{N1})	98.9	上海萨恩化学技术有限公司	553-26-4	25	60	普通
1,2-双(4-吡啶)乙烷(L _{N2})	98.9	吉林省研伸科技有限公司	4916-57-8	5	382.5	普通
1,4-二(对吡啶基)苯(L _{N3})	97.9	吉林省研伸科技有限公司	113682-56-7	5	325	普通
1,4-二吡啶-2,5-二甲氧基苯(L _{N4})	98.9	吉林省研伸科技有限公司	1415393-43-9	5	360	普通
4,4'-二(4-吡啶基)联苯(L _{N5})	98.9	吉林省研伸科技有限公司	319430-87-0	5	300	普通
9,10-二(4-吡啶基)蒽(L _{N6})	98.9	吉林省研伸科技有限公司	194861-72-8	5	300	普通
9,10-二-β-(4-吡啶基)乙烯基蒽(L _{N7})	98.9	吉林省研伸科技有限公司	113308-38-6	5	300	普通

(待续)

(续表1)

试剂名称	纯度/%	制造商	CAS	规格/g	价格/元	保存方法
1,3,5-三(4-吡啶基)苯(L _{N8})	99.9	吉林省研伸科技有限公司	170165-84-1	5	384	普通
4-(2,4,5-三吡啶-4-基苯基)吡啶(L _{N9})	97.9	吉林省研伸科技有限公司	170165-81-8	5	300	普通
四苯基硼酸钠(L _B)	99.9	上海萨恩化学技术有限公司	143-66-8	25	70	普通
三氟甲烷磺酸镉(M)	99.9	上海萨恩化学技术有限公司	139177-62-1	25	488	普通

1.3 仪器和表征方法

本实验使用的仪器列于表4中。

表4 仪器和表征方法

仪器名称	型号	制造商
珀金埃尔默荧光分光光度计	FL8500	珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司
X射线衍射仪	DMAXU1TIMAIV	日本理学
单晶X衍射仪	Bruker Smart Apex II CCD型	德国布鲁克公司
电热鼓风干燥箱	DHG-9070A	上海一恒科学仪器有限公司
电子天平	ME104E/02	METTLER TOLEDO(中国梅特勒-托利多仪器有限公司)
显微镜	XTS20	华威科创科技有限公司
手提紫外检测灯	ZF-7A	上海宝山顾村电光仪器厂

1.4 实验步骤/方法

化合物[L_N(L_B)_{*n*}] (*n* = 2, 化合物1–7; *n* = 3, 化合物8; *n* = 4, 化合物9)的合成: 如图3所示, 将B载体NaB(C₆H₅)₄ (L_B, 0.2 mmol, 0.0684 g), Dy(O₃SCF₃)₃ (0.1 mmol, 0.0610 g)与N载体(L_{N1}–L_{N9}, 0.1 mmol)加入到10 mL聚四氟乙烯内衬中, 分别向内衬中加入3 mL CH₃OH, 2 mL 1,4-Dioxane以及1 mL DMF, 并于烘箱0.5 h程序升温至70 °C, 保持温度3 h后程序降温(0.5 h)至室温, 过滤得到晶体, 重复率接近100%。在合成化合物1–9的过程中, 配体与金属盐的合成比例*n*(M) : *n*(L_N) : *n*(L_B)均为1 : 1 : 2 (表5), 所用溶剂的体积比*V*(1,4-Dioxane) : *V*(DMF) : *V*(CH₃OH) = 2 : 1 : 3, 以上化合物的合成方法具有普适性。

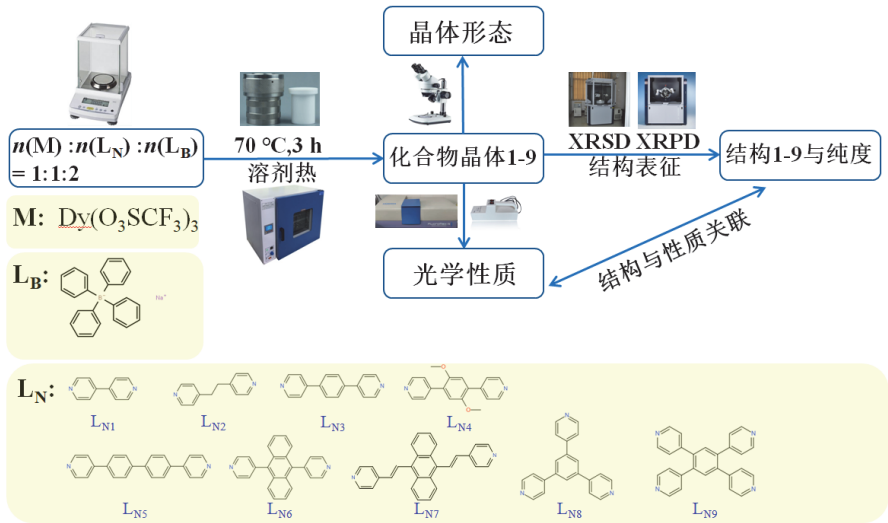


图3 化合物1–9的合成路线与表征

M: 三氟甲烷磺酸镉, Dy(O₃SCF₃)₃; L_N: 吡啶衍生物; L_B: 四苯基硼酸钠, NaB(C₆H₅)₄

表5 化合物1-9的产物信息

化合物	L _N	晶型及颜色	产率	化合物	L _N	晶型及颜色	产率
1	L _{N1}	淡黄色长方形状晶体	49%	6	L _{N6}	黄色块状晶体	91%
2	L _{N2}	无色长条块状晶体	56%	7	L _{N7}	橙色长条块状晶体	93%
3	L _{N3}	淡黄色块状晶体	83%	8	L _{N8}	无色块状晶体	47%
4	L _{N4}	黄色块状晶体	85%	9	L _{N9}	无色块状晶体	39%
5	L _{N5}	淡黄色长条块状晶体	87%				

2 结果与讨论

2.1 晶体描述

通过溶剂热合成得到空气稳定的化合物晶体, 其中化合物**5-7**的产率大、重复率好、纯度高、晶型美观。通过对比实验发现Dy(O₃SCF₃)₃在化合物合成过程中起到了催化剂或者调控溶液pH的作用, 在不加镧盐情况下不能得到目标物, 如果换成其他镧盐不能得到纯相。通过显微镜观察(图4), 化合物**1**、**3**、**5**为淡黄色块状晶体, 化合物**4**、**6**为黄色块状晶体, **2**、**8**、**9**为无色块状晶体, 化合物**7**呈现橙色长条块状晶体。

2.2 结构表征

2.2.1 X射线晶体学

单晶X射线实验采用石墨单色化Cu-K α 射线($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$, 下同), 通过安捷伦Xcalibur Eos Gemini X射线衍射仪完成。使用CrysAlisPro软件对数据进行整合。使用SADABS程序执行多重扫描吸收校正。采用SHELXL-2018程序直接法解结构。所有非氢原子均进行各项异性精修。化合物**1-9**的晶胞数据、数据收集参数详见补充材料表S1和表S2。

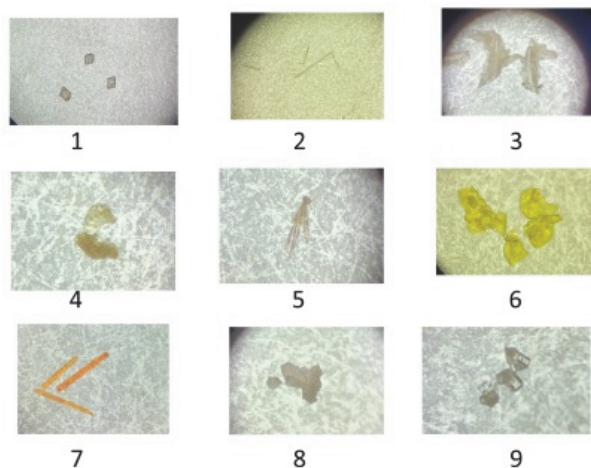


图4 化合物1-9的晶体形态与颜色

电子版为彩图

2.2.2 结构描述

L_N上拥有孤对电子的N可作为“路易斯碱”进攻三苯基硼烷中具有空轨道的B原子, 从而形成一类“桥接”着两个三苯基硼烷分子的联吡啶衍生物[L_N(L_B)_n] (图5)。化合物**1-9**表现出不同的B←N键长(补充材料表S3), 其中化合物**6**中的B←N键键长达到1.6662(15) $\text{\AA}$, 长于其他化合物。此外, 化合物**1-9**表现出不同的堆积模式, 这对聚集诱导发光性质会产生重要影响。

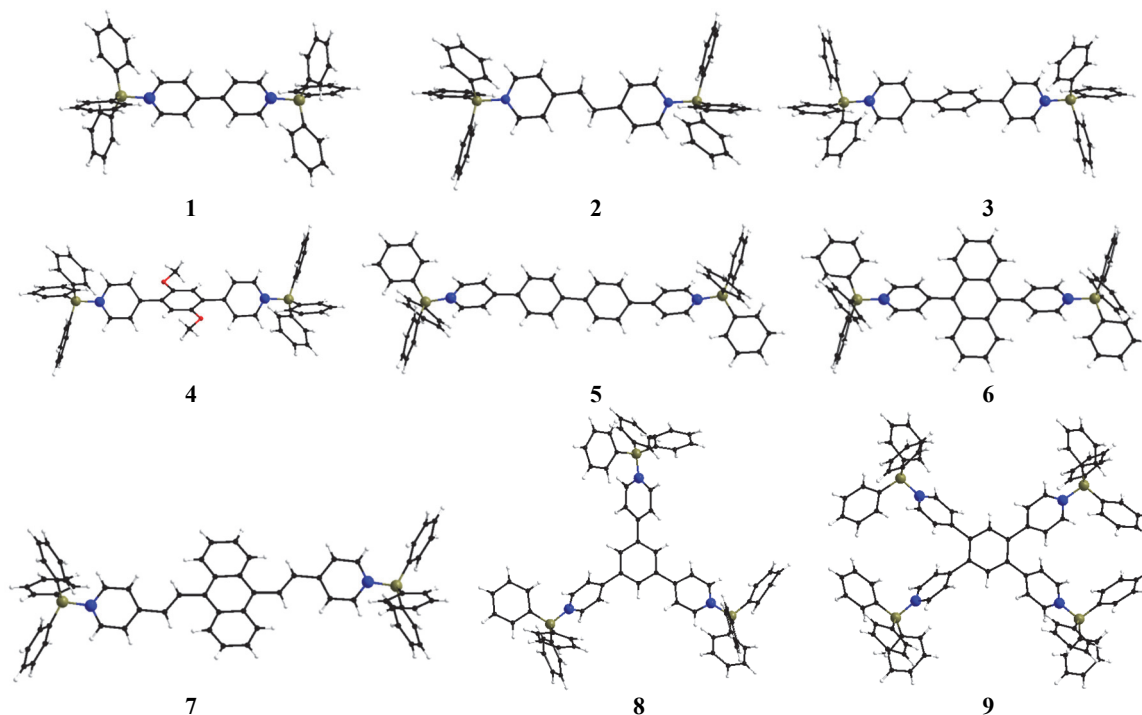


图5 化合物1-9的分子结构图

2.2.3 光学性质研究

为了确认样品1-9的晶相纯度,对其进行了X射线粉末衍射(XRPD)测试(补充材料图S1)。实验图谱与来自Mercury 2.6软件相应的模拟图谱相吻合,说明1-9为纯相。

通过手持式紫外灯照射可以发现,化合物1-9表现出了不同的光学性质(图6),其中化合物5-7荧光行为分别表现出明显的“有无”“颜色”“强弱”变化特点,综合化合物1-9的产率、重复性、纯度、晶型以及荧光特点,选取化合物5-7做深入研究。

从荧光光谱图(图7)中可以看出,有机配体有荧光,而合成的荧光小分子没有荧光,这与图6的紫外灯照射结果一致,从配体到合成的化合物5,荧光出现了“从有到无”的现象。

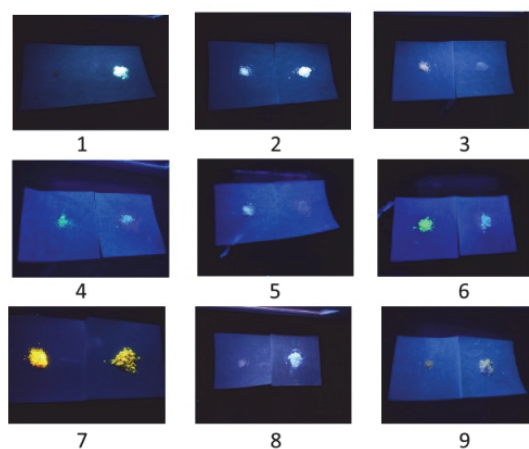


图6 化合物1-9的紫外灯照射图

每个小图中左侧为化合物晶体;右侧为含氮桥连配体

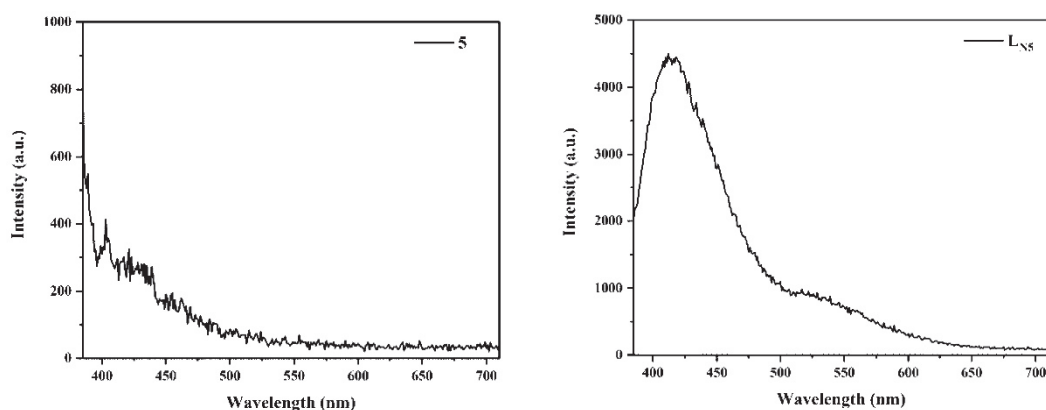


图7 化合物5 (左)和配体LN5 (右)的荧光光谱图

如图8所示,有机配体与合成的荧光小分子均出现了荧光,但有机配体的荧光强度大于合成的荧光小分子,并且荧光小分子的峰位置发生了红移,解释了在紫外灯照射下化合物6与配体LN6出现了明显的荧光“颜色”变化。

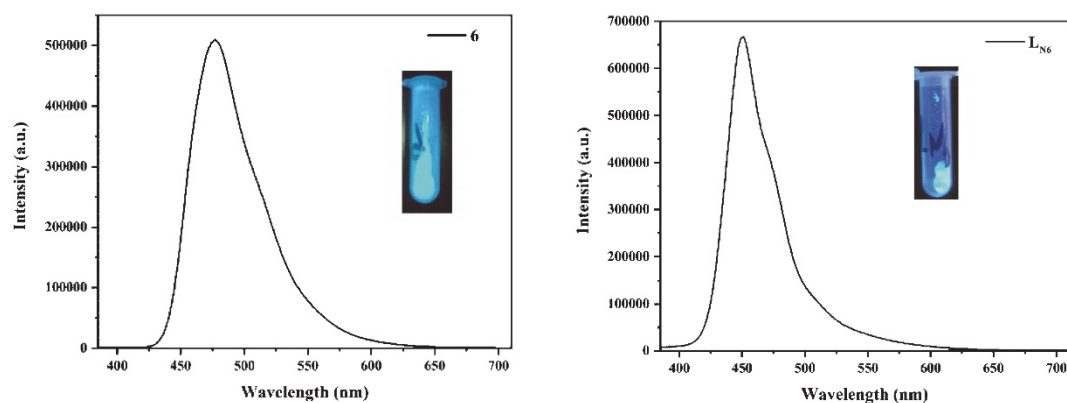


图8 化合物6 (左)和配体LN6 (右)的荧光光谱图

电子版为彩图,下同

如图9所示,有机配体和合成的荧光小分子均有荧光,并且两个峰出现的位置相同,说明荧光小分子7的荧光主要来源于有机配体,但从荧光强度来看,化合物7稍强于有机配体,这与紫外灯照射的现象一致,即荧光强度出现“强弱”变化。

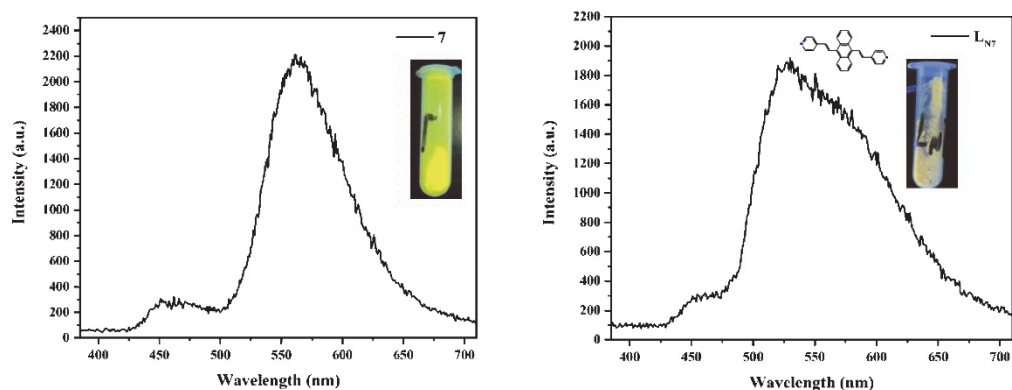


图9 化合物7 (左)和配体LN7 (右)的荧光光谱图

2.2.4 结构与荧光性质讨论

从化合物**5-7**的堆积图(图10)可以发现,化合物**6**和**7**中由于三苯基硼烷分子中的苯环所在的空间区域更小,苯环旋转受到了明显的限制,基于聚集诱导发光原理和结构分析,不同的堆积方式和配体共轭程度决定了性质的不同。由配体L_{N5}到化合物**5**荧光“从有到无”的现象,可能是由于外围三苯基硼烷中的苯环“转子”通过单键环绕中心自由旋转,以非辐射的形式消耗了激发态的能量,导致化合物**5**不发光。而化合物**6**、**7**的荧光发生“颜色变化”以及“由弱变强”现象,是由于含氮配体的不同共轭程度,以及在聚集状态三苯基硼烷分子中的苯环旋转受到空间限制,即AIE分子内旋受到了很大阻碍且阻碍程度不同,从而抑制了激发态的非辐射衰变渠道,打开了辐射衰变渠道,使荧光增强或者变化。

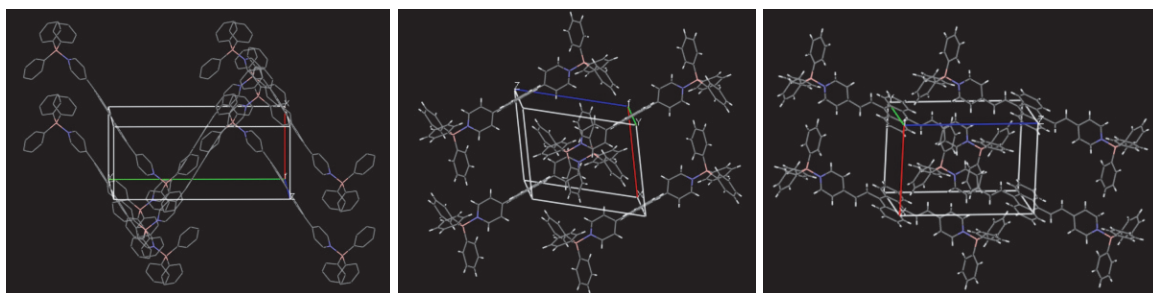


图10 配合物**5-7** (从左至右)的分子堆积图

2.2.5 实践教学

通过申请,经学院批准,在2022年6月6日进行了实验实践教学,统计结果见表6:参加实验的人数为21人,分为10组,其成功率合成为93%,表征为97.5%。

表6 实验教学情况统计表

组数	合成	表征
1	✓	粉末衍射测试中,因将化合物 6 研磨过细,导致峰出现宽化现象
2	✓	✓
3	✓	荧光光谱测试中,配体 7 在稀释时被引入杂质
4	✓	✓
5	✓	单晶衍射显示化合物 6 所得个别数据与教师提供的数据偏差较大
6	✓	✓
7	化合物 7 不是纯相,主要是由于加入过量的三氟甲烷磺酸铯	✓
8	✓	✓
9	✓	✓
10	化合物 5 不是纯相,三氟甲烷磺酸铯用量不足	✓

“✓”代表学生实验成功

2.3 创新实验的教学设计

- 1) 实验题目:基于Lewis酸-碱作用合成B←N键配位化合物及其荧光性质研究。
- 2) 实验类型:综合性实验。
- 3) 授课对象:具有无机化学与有机化学学习基础的本科二年级学生,设置20人为一个实验班(2人/组)。

4) 实验时间: 11学时(8.5 h) = 实验讲解(0.5 h) + 称量(0.5 h) + 溶剂热合成与Mercury、Origin、Diamond软件讲解(4 h) + 样品过滤、收集、手持式紫外灯以及显微镜观察(0.5h)+荧光表征(4台, 0.5 h) + X射线粉末衍射(2台, 1.5 h) + 分子结构表征(1 h) (可选用X射线单晶衍射仪、有机质谱仪及核磁共振仪, 根据学校实际科研条件选择, 进行晶体单胞数据收集)。

5) 预习提纲: a) 路易斯酸碱理论与聚集诱导发光原理; b) 溶剂热合成与注意事项。

6) 实验原理: 路易斯酸碱理论, 聚集诱导发光原理, 溶剂热原理。

7) 实验目的: a) 掌握路易斯酸碱理论与聚集诱导发光原理; b) 熟练操作电子分析天平、粉末衍射仪、荧光分析仪器、显微镜、手持式紫外灯等仪器使用; c) 掌握溶剂热方法; d) 熟练运用Diamond画图软件与Origin数据处理软件。

8) 仪器与药品: 合成化合物5-7所需药品见表3, 仪器设备见表4。

9) 实验准备: 按照20人为一个教学班, 2人一组, 准备合成化合物5-7的有机配体各2 g (L_{N5} , L_{N6} , L_{N7}), 四苯硼钠(2 g), 三氟甲烷磺酸铕(2 g), 甲醇(1瓶, 500 mL, $\geq 99.9\%$, HPLC/ACS级), 1,4-二氧六环(1瓶, 500 mL, $\geq 99.9\%$, HPLC/ACS级), DMF (1瓶, 500 mL, $\geq 99.9\%$, HPLC/ACS级)。

10) 实验总成本: 药品与试剂成本约300元/20人。

11) 实验内容与步骤: a) 合成化合物5-7; b) 初步观察样品; c) 深入研究: 结构表征、纯度表征与荧光表征; d) 使用Diamond软件绘制分子结构图; e) 使用Mercury软件得到分子堆积图; f) 使用Origin软件处理XRPD测试数据。

12) 结果与讨论: a) 通过结构分析, 理解 $B \leftarrow N$ 配位键; b) 通过配体变化, 调节荧光“有无”“颜色”以及“强弱”变化, 探索结构与性质相关性。

13) 注意事项: a) 反应釜降温至室温, 才可打开; b) 控制催化剂三氟甲烷磺酸铕的用量, 避免引入杂质。

14) 思政融入点与目标: 在授课过程中引入“榫卯结构”和由中国科学家原创的AIE原理, 在大力弘扬中国传统文化, 增强学生的民族认同感和自豪感的同时增强科研自信。

3 结语

基于路易斯酸碱理论, 选择“一锅法”, 将具有孤电子对的含氮(N)桥连配体(L_N)与具有空轨道的含硼(B)四苯基硼酸钠(L_B)在溶剂热条件下反应, 形成吡啶衍生物 $[L_N(L_B)_n]$, 通过酸-碱作用得到具有 $B \leftarrow N$ 键的配位化合物, 表现出不同的 $B \leftarrow N$ 键长和分子堆积模式。

通过性质研究发现, 化合物5-7表现出“有无转变”“颜色调变”以及“强弱变化”的光学行为。化合物5荧光“从有到无”现象, 可能是由于外围苯环通过单键旋转, 并以非辐射的形式消耗了激发态的能量, 导致荧光消失。而化合物6、7的荧光出现“颜色变化”以及“由弱变强”现象, 是由于含氮配体不同的共轭程度, 以及在聚集状态下空间限制, AIE分子内旋受到了很大阻碍且阻碍程度不同, 从而抑制了激发态的非辐射衰变渠道, 打开了辐射衰变渠道, 使荧光增强或者变化。

通过实验体会结构决定性质的思想, 真正感受“看得见, 摸得着”的化学理论。教师在讲授中可穿插具有中国特色的“榫卯结构”以及“中国标签”的AIE理论, 提高思政贴合度。

4 创新性

- (1) 基于“一锅法”得到 $B \leftarrow N$ 键配位化合物;
- (2) 通过不同配体调控发光性质, 结合AIE理论与“榫卯结构”理解机理;
- (3) 体会结构决定性质的思想, 真正感受“看得见, 摸得着”的化学理论。

补充材料: 可通过链接<http://www.dxhx.pku.edu.cn>免费下载。

参 考 文 献

- [1] 吴国庆. 无机化学(上册). 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [2] 邢其毅, 裴伟伟, 徐瑞秋, 裴坚. 基础有机化学(上册). 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [3] 贾之慎. 无机及分析化学. 北京: 高等教育出版社, 2008: 99-100.
- [4] Lewis, G. N. *Valence and the Structure of Atoms and Molecules*; Chemical Catalogue Company: New York, NY, USA, 1923.
- [5] 李孙霞. 榫卯结构在现代实木家具中的应用研究[硕士学位论文]. 杭州: 中国美术学院, 2013.
- [6] Hong, Y.; Lam, J. W. Y.; Tang, B. Z. *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 5361.
- [7] Hong, Y.; Lam, J. W. Y.; Tang, B. Z. *Chem. Commun.* **2009**, *29*, 4332.
- [8] Xie, Y. J.; Li, Z. *Natl. Sci. Rev.* **2021**, *8*, nwaa199.
- [9] Dang, D. F.; Qiu, Z. J.; Han, T.; Liu, Y.; Chen, M.; Kwok, R. T. K.; Lam, J. W. Y.; Tang B. Z. *Adv. Funct. Mater.* **2018**, *28*, 1707210.