

·教学·

高分子化学综合实验设计：三嗪基多孔聚合物的合成及其染料吸附性能

董彬* 周慧茹 郭玉盈 刘昱昊

(中国矿业大学化工学院, 徐州 221116)

摘要: 基于三嗪基多孔聚合物的合成及其应用于染料吸附的创新性成果设计了综合实验。以碘化钾为催化剂, 大大缩短了亲核取代反应合成三嗪基多孔聚合物 P(CC-CH) 的反应时间, 并测定其染料吸附性能, 使学生深入认识芳香杂环亲核取代反应、催化剂的重要性以及染料废水处理方法, 掌握红外光谱仪、X 射线衍射仪、紫外-可见分光光度计等表征手段, 提高学生的环境污染与防治意识和利用所学知识解决社会实际问题的能力。本实验学时紧凑, 仪器表征简便, 试剂成本低廉, 适合在化学或相关专业的本科实验教学中推广。

关键词: 多孔聚合物; 科研成果转化; 染料吸附; 芳香杂环亲核取代反应; 综合化学实验

Comprehensive Experiment Design of Polymer Chemistry: Synthesis of a Triazine-based Porous Polymer and Its Dye Adsorption Performance

DONG Bin*, ZHOU Hui-ru, GUO Yu-ying, LIU Yu-hao

(School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on the innovative achievement in the preparation of a triazine-based porous polymer and its application in dye adsorption, a comprehensive experiment is designed. Potassium iodide was used as the catalyst, greatly shortening the reaction time of nucleophilic substitution reaction to synthesize the triazine-based porous polymer P(CC-CH). Together with its dye adsorption behavior, students can have a deep understanding of the aromatic nucleophilic substitution reaction, the importance of catalyst, and the dye wastewater treatment. Meanwhile, students will master the use of infrared spectrometer, X-ray diffractometer, and UV-Vis spectrophotometer, be awareness of environmental pollution and prevention, as well as improve the ability of using knowledge to solve practical social problems. Considering compact class hours as well as convenient instruments and low-cost reagents used, this experiment is suitable for promotion in undergraduate experiments of chemistry or other related majors.

Keywords: Porous polymers; Transformation of scientific research achievements; Dye adsorption; Aromatic heterocyclic nucleophilic substitution reaction; Comprehensive chemistry experiments

引用: 董彬, 周慧茹, 郭玉盈, 刘昱昊. 高分子化学综合实验设计: 三嗪基多孔聚合物的合成及其染料吸附性能. 高分子通报, 2024, 37(7), 967-973

Citation: Dong, B.; Zhou, H. R.; Guo, Y. Y.; Liu, Y. H. Comprehensive experiment design of polymer chemistry: synthesis of a triazine-based porous polymer and its dye adsorption performance. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2024, 37(7), 967-973

2023-11-23 收稿, 2024-01-12 录用, 2024-03-28 网络出版

基金项目: 应用化学国家一流本科专业建设点, 江苏省大学生创新创业训练计划校企合作基金项目 (基金号 202210290168Y)

* 通信联系人: 董彬, E-mail: cumtdong@cumt.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.23.392

染料废水难降解、酸性强、COD高、色度深、易致畸,如果不经处理会导致水域生态平衡遭到破坏,对人类及其他生物的健康造成极大的威胁^[1]。将染料废水的处理融入本科教学中,使学生通过实验掌握处理染料废水方面的知识,是教学对国家绿色可持续发展战略需求的积极响应,也是为国家培养应用服务型化学人才的考虑^[2]。吸附法由于去除效率高、成本低、操作简单等优势被广泛关注^[3],其关键在于吸附剂的选择。共价三嗪骨架,也称为三嗪基多孔聚合物,具有丰富的氮位点、较高的比表面积和稳定性以及优异的电子效应,可作为染料吸附剂^[4-6]。在三嗪基多孔聚合物的合成方法中,亲核取代反应法操作简便,且原料廉价,然而其反应时间普遍大于24 h^[7-10],限制了在本科实验教学中的应用。

教育部在2017年《化学类专业化学实验教学建议内容》和2018年《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》中都对多孔材料有明确的教学要求。然而与多孔材料尤其是有机多孔材料相关的实验项目进入教材和实际开展的相对较少,学生不能很好地接触多孔材料领域的前沿及热点^[11]。2019年,教育部印发了《教育部关于深化本科教育教学改革 全面提高人才培养质量的意见》,明确提出“推动科研反哺教学”。基于此,我们探索亲核取代反应法合成三嗪基多孔聚合物的催化剂,有效缩短反应时间,并将该前沿科研成果转化为本科实验教学资源^[12-14]。

本实验以三聚氯氰(cyanuric chloride, CC)与碳酰肼(carbohydrazid, CH)为反应原料,碳酸钠为缚酸剂,1,4-二氧六环为溶剂,碘化钾为催化剂(同时以碘化钠作为对比),制备一种三嗪基多孔聚合物P(CC-CH)(图1),对其进行结构表征和染料吸附性能测试。本实验集合成、提纯、结构表征和实际应用于一体,理论知识涉及芳杂环的亲

核取代反应、多孔聚合物的制备、吸附剂-吸附质相互作用等,联系了高分子化学、有机化学、分析化学、物理化学等多个化学二级学科,能培养学生的实践能力和创新意识,激发学生对科研的热情。

1 实验部分

1.1 实验原理

实验原理主要涉及芳香亲核取代反应和吸附剂-吸附质相互作用。

影响芳杂环亲核取代反应的因素有亲核试剂的亲核性、离去基团的离去能力以及溶剂等。对于本实验中的反应,亲核试剂CH的亲核性不强,当引入催化剂碘化钾时,碘离子作为较强的亲核试剂进攻底物CC形成碘代化合物。同时碘离子又是较容易离去的离去基团,碘代化合物容易被其他亲核试剂进攻^[15]。因此,本实验中碘化钾作为催化剂提高了亲核试剂CH与CC的反应能力。

染料分子作为吸附质与多孔材料吸附剂之间可能存在静电作用、 π - π 相互作用和氢键等多种相互作用^[16-18]。本实验合成的三嗪基多孔聚合物P(CC-CH)由于富含三嗪环,表现为带负电状态,有利于与阳离子染料通过静电引力结合,从而表现出高效的吸附效果。由于静电斥力的存在,P(CC-CH)对阴离子染料基本没有吸附效果。

t 时刻染料溶液的浓度 c_t 由朗伯-比尔定律结合标准曲线得出,如方程(1)所示:

$$A = \kappa bc \quad (1)$$

式中, A 为吸光度; κ 为摩尔吸光系数(L/(mol·cm)), c 为浓度(mol/L), b 为吸收层厚度(cm)。

染料去除率 R 和吸附容量 Q_t 的计算分别如方程(2)和(3)所示:

$$R = (c_0 - c_t) / c_0 \times 100\% \quad (2)$$

$$Q_t = (c_0 - c_t) V / m \quad (3)$$

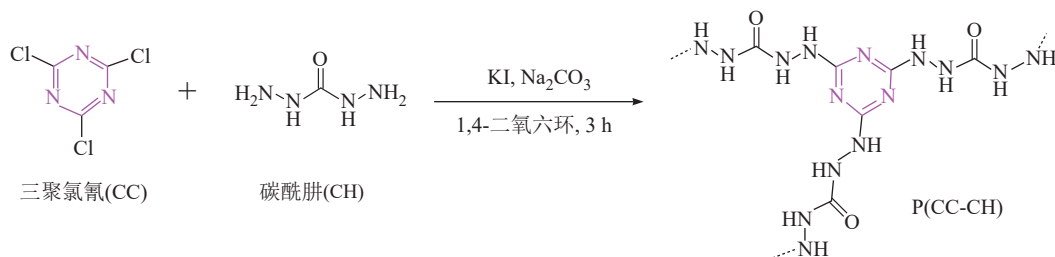


图1 三嗪基多孔聚合物 P(CC-CH) 的合成路线

Figure 1 The synthetic route of triazine-based porous polymer P(CC-CH)

式中, c_0 表示染料溶液的初始浓度 (mg/L), c_t 是 t 时刻的染料溶液浓度 (mg/L), Q_t 为 t 时刻的吸附容量 (mg/g), V 为染料溶液的体积 (mL), m 为吸附剂的质量 (g)。

吸附动力学行为采用准一级和准二级动力学方程进行分析, 分别如方程 (4) 和 (5) 所示^[9]:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_1 t \quad (4)$$

$$t/Q_t = t/Q_e + 1/K_2 Q_e^2 \quad (5)$$

式中, K_1 为准一级吸附速率常数, K_2 为准二级吸附速率常数, Q_e 为饱和吸附容量 (mg/g)。

1.2 试剂或材料

三聚氯氰(CC)、碳酰肼(CH)、碘化钾、碳酸钠、1,4-二氧六环、*N,N*-二甲基甲酰胺(*N,N*-dimethylformamide, DMF)、四氢呋喃(tetrahydrofuran, THF)、亚甲基蓝(methylene blue, MB)、甲基橙(methyl orange, MO)。

电子天平、恒温加热磁力搅拌器、空气泵、低速离心机、烘箱、回旋式振荡器、紫外-可见分光光度计、傅里叶变换红外光谱仪、X射线衍射仪。

1.3 实验步骤/方法

1.3.1 P(CC-CH)的合成与提纯

典型的合成操作如下: 将单体CC (553 mg, 3 mmol)、CH (405 mg, 4.5 mmol)、碘化钾(45 mg, 0.27 mmol)和碳酸钠(1.06 g, 10 mmol)加入盛有25 mL 1,4-二氧六环的圆底烧瓶中, 在磁力搅拌下加热回流3 h。为了明确催化剂的种类和用量对反应的影响(表1), 一种催化剂条件安排2~3组进行, 在实验结束后共享数据进行交流讨论, 对比不同催化剂条件下的产率, 找出最优催化条件。

表1 反应中催化剂的种类及用量

Table 1 The catalyst type and amount used in the synthetic process

序号	催化剂种类	用量
1	KI	35 mg (0.21 mmol)
2	KI	45 mg (0.27 mmol)
3	KI	60 mg (0.36 mmol)
4	NaI	40 mg (0.27 mmol)

反应混合物经离心、减压过滤处理, 滤饼依次用20 mL去离子水、DMF和THF分别洗涤两次, 然后置于烘箱中在150 °C干燥20 min, 得到土黄色粉末状的目标产物三嗪基多孔聚合物, 记为P(CC-CH)。

1.3.2 染料标准曲线的测定

使用100 mg/L MB母液用容量瓶配制浓度为10、20、40、50、80 mg/L的MB溶液(50 mg/L配制100 mL, 其余为50 mL), 测试紫外可见(Ultraviolet-visible, UV-Vis)谱图, 然后以664 nm波长下的吸光度依据朗伯-比尔定律绘制标准曲线。在同样的实验操作下, 以465 nm波长下的吸光度绘制MO的标准曲线。

1.3.3 产物表征

测定CC、CH和P(CC-CH)的傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared, FTIR)谱图和X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)谱图。

FTIR测试: 称取1 mg左右P(CC-CH)样品研细, 加入100~200 mg磨细干燥的KBr粉末后混合均匀, 通过压力机制成透明片, 然后使用FTIR-650光谱仪在400~4000 cm^{-1} 范围中进行测定。

XRD测试: 取10 mg左右P(CC-CH)样品, 在样品槽中压平后使用D8 Advance X射线衍射仪进行测定: 2θ 范围5°~80°, 采样间隔0.01945°, 扫描速度0.07~0.2 s/step, 电压40 kV, 电流30 mA。

1.3.4 染料吸附

称取10 mg P(CC-CH)分别加入盛有10 mL 50 mg/L MB或MO溶液中, 在180 r/min条件下震荡10 min。取少量溶液, 经滤膜过滤后测定滤液的UV-Vis谱图, 使用1.3.2节中绘制的标准曲线确定吸附后溶液中的MB或MO浓度。同样的实验操作, 测试P(CC-CH)对MB/MO混合溶液的吸附效果(混合溶液经等体积等浓度的MB溶液和MO溶液混合得到, 混合前体积和浓度分别为5 mL和100 mg/L)。

吸附动力学研究可以对P(CC-CH)与MB溶液的吸附体系进行开展: 准备6种吸附体系, 分别在震荡2、5、10、15、20和25 min时取出1份样品, 经滤膜过滤后测定滤液的UV-Vis谱图, 使用1.3.2节中绘制的标准曲线确定吸附后溶液中的MB浓度。

2 结果与讨论

2.1 P(CC-CH)的合成条件

三聚氯氰(CC)和碳酰肼(CH)为原料合成三嗪基多孔聚合物P(CC-CH)的反应条件主要考察了催化剂种类和用量的影响, 而考虑到产率和教学时长, 反应时间的影响不在实验教学中开展。实验结果表明: 碘化物作为催化剂的使用, 明显缩

短亲核取代反应法合成三嗪基多孔聚合物的反应时间,而且碘化钾的效果略优于碘化钠,且用量对产率存在影响。当碘化钾的物质的量是单体CC的9%时,聚合物P(CC-CH)的产率最高(86.4%),此时CC、CH、碘化钾和碳酸钠的物质的量比为1:1.5:0.09:10。

2.2 产物P(CC-CH)的表征

图2(a)是CC、CH和P(CC-CH)的FTIR谱图。在单体CC中,三嗪环的特征峰出现在1692、1573和1260 cm^{-1} , C—Cl键的特征峰出现在856 cm^{-1} 。在单体CH中, N—H的特征峰出现在3250 cm^{-1} 左右。相比之下,聚合物P(CC-CH)的FTIR谱图在856 cm^{-1} 附近没有峰,说明芳香亲核取代反应进行完全生成了聚合物。相应地,三嗪环和N—H的特征峰出现在了聚合物P(CC-CH)中。

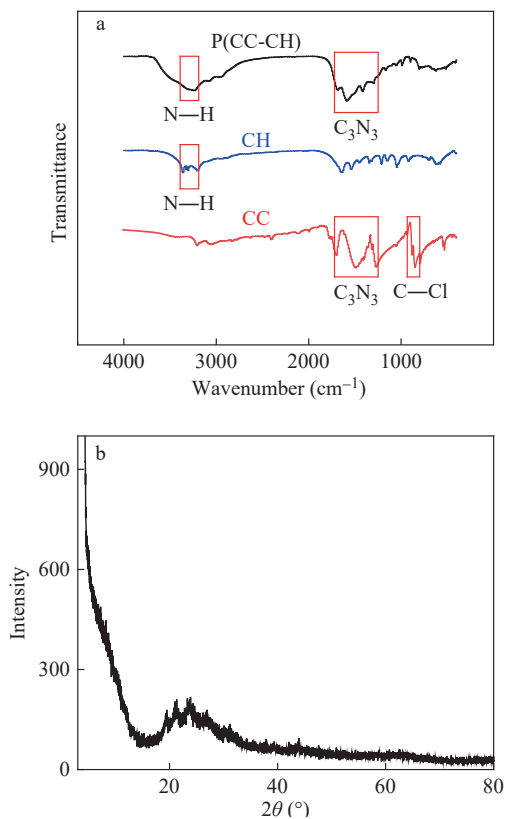


图2 (a) P(CC-CH)、CH与CC的FTIR谱图以及(b) P(CC-CH)的XRD谱图

Figure 2 (a) FTIR spectra of P(CC-CH), CH and CC as well as (b) the XRD pattern of P(CC-CH)

对产物P(CC-CH)进行XRD表征,结果如图2(b)所示。在小角度没有出现衍射峰,只在23°附近出现一个宽峰,这表明P(CC-CH)不具备晶型,是一种无定形材料。

2.3 染料标准曲线的绘制

图3是染料MB和MO的标准曲线,斜率分别为0.0124和0.0076。吸附后溶液中的染料浓度根据朗伯-比尔定律通过吸光度确定。

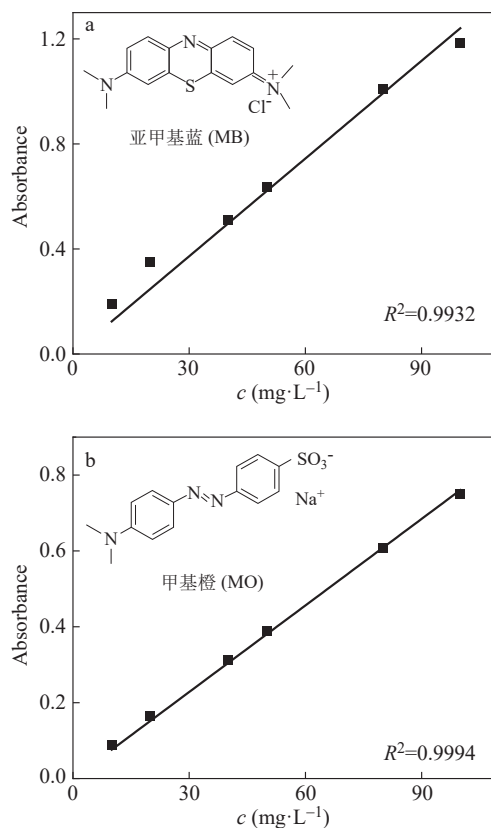


图3 (a) MB与(b) MO两种染料的标准曲线

Figure 3 The standard curves of (a) MB and (b) MO

2.4 聚合物的染料吸附行为

50 mg/L的MB溶液经P(CC-CH)吸附后显示为无色(图4a),表明MB被P(CC-CH)从溶液中完全吸附去除。这一结果进一步通过UV-Vis谱图得到证明:吸附后溶液的吸光度在664 nm处基本为0,去除率 R 达到100%。相比较之下,50 mg/L的MO溶液经P(CC-CH)吸附后仍为橙色(图4b),表明吸附效果极差。根据UV-Vis谱图,吸附后溶液在465 nm处的吸光度为0.341,通过标准曲线计算得到MO浓度为45 mg/L,进一步计算去除率 R 为10%。三嗪基多孔聚合物P(CC-CH)对MB和MO两种染料的吸附效果差异是因为P(CC-CH)在结构中含有大量的三嗪环,表现出负电性,通过静电吸引力能够有效吸附阳离子染料MB,而因为静电斥力对其阴离子染料MO的吸附能力差^[20]。

随后,开展聚合物P(CC-CH)对MB和MO混

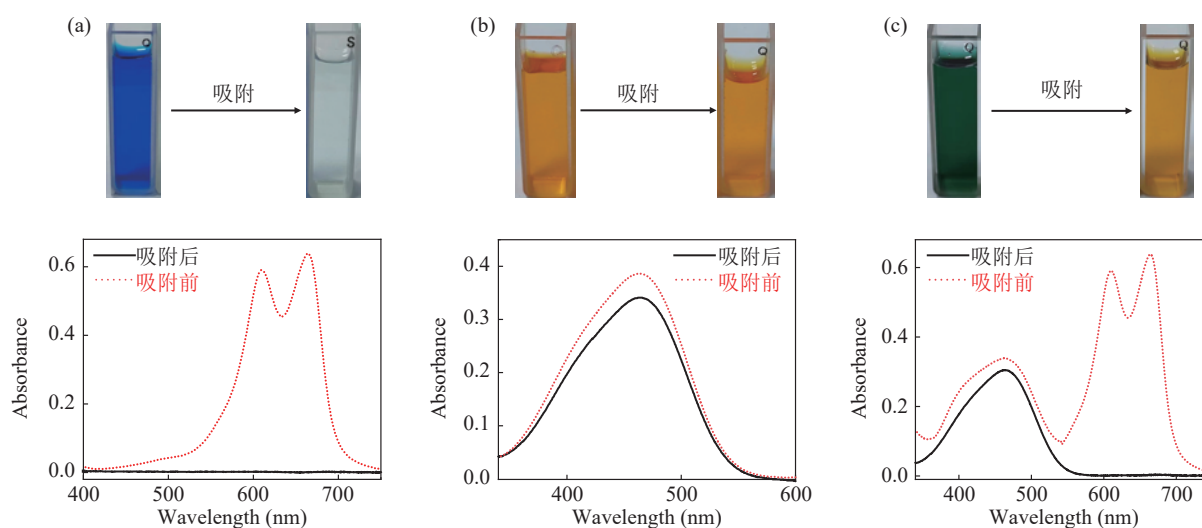


图4 (a) MB溶液, (b) MO溶液以及 (c) MB/MO混合溶液在 P(CC-CH) 吸附前后的照片和 UV-Vis 谱图

Figure 4 Photographs and UV-Vis spectra of (a) MB solution, (b) MO solution, and (c) MB/MO mixed solution before and after P(CC-CH) adsorption

合溶液(浓度均为 50 mg/L)的吸附行为研究。经 P(CC-CH) 吸附后, 混合溶液呈现橙色(图 4c)。鉴于 MB 和 MO 溶液的颜色, 此结果表明混合溶液中的 MB 被 P(CC-CH) 完全吸附去除, 只剩余大量的 MO。UV-Vis 谱图进一步证明了这一结果: 吸附后溶液的吸光度在 664 nm 处基本为 0, 而在 465 nm 处的吸光度仍接近吸附前的数值。P(CC-CH) 能够高效地吸附去除混合溶液中的 MB, 而不受体系中 MO 的干扰, 表现出优异的选择性吸附能力。

2.5 吸附动力学研究

通过聚合物 P(CC-CH) 对染料 MB 的吸附行为, 可以进一步研究时间对吸附效果的影响, 即吸附动力学研究。吸附行为使用准一级和准二级动力学方程进行拟合, 结果如图 5 所示, 相关系数 R^2 分别为 0.7188 和 0.9933, 说明准二级动力学模型能较好地反映吸附情况, P(CC-CH) 对 MB 的吸附属于化学吸附过程。

3 教学过程及结果分析

本实验由两个学生一组来完成, 总时长设计为 8 学时, 具体安排如表 2 所示。实验过程中, 除了组内合作以外, 还有组间合作, 协作探究催化剂的种类和用量对聚合物 P(CC-CH) 合成的影响。

本实验的学时安排合理, 实验操作可重复, 实验结果和讨论具有一定程度的开放性, 有利于学生利用所学知识对实验结果进行分析讨论, 充

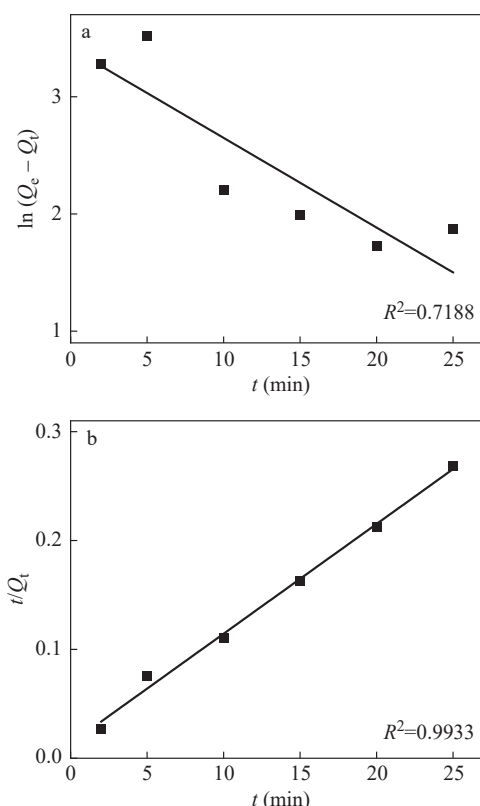


图5 P(CC-CH) 在 MB 溶液中吸附的(a)准一级和(b)准二级动力学模型拟合线

Figure 5 The fitting lines of (a) pseudo-first-order and (b) pseudo-second-order kinetic models for P(CC-CH) adsorption in MB solution

分激发学生对科研的热情。笔者发现学生参与本实验的兴趣非常高, 本实验适合在本科实验教学中开展, 助力培养学生的创新思维和能力。

表2 实验各项安排与用时

Table 2 Experiment arrangement and time used

项目	用时 (min)
理论知识讲解: 实验目的、实验原理、实验内容与步骤、数据处理、注意事项等。	30
合成: 称量各种试剂, 在加热回流下反应 3 h 合成三嗪基多孔聚合物 P(CC-CH)。	195
标准曲线的绘制: 移液管移取、容量瓶定容配制一系列浓度的 MB 和 MO 溶液, 用 UV-Vis 分光光度计测定 UV-Vis 谱图, 绘制标准曲线。	上一项过程中进行
产物提纯: 反应结束待冷却后进行离心、减压过滤, 洗涤纯化后在烘箱中 150 °C 下干燥处理 20 min, 得到目标产物 P(CC-CH), 称重, 并计算产率。	45
产物表征: FTIR 和 XRD 表征。	30
染料吸附: P(CC-CH) 加入到染料溶液中, 震荡 10 min, 过滤后测定 UV-Vis 谱图, 同时拍摄吸附前后的照片作为比较。	25
吸附动力学测试(选做): P(CC-CH) 加入到 MB 溶液中, 震荡过程在不同时间取出样品, 过滤后测定 UV-Vis 谱图, 计算吸附数据并通过动力学方程进行拟合。	30
合计	355

4 教学效果

本实验设计成熟后, 研究小组在相同条件下分别独立进行 3 次实验操作。结果表明: 在确定的实验条件下均得到聚合物 P(CC-CH), 产率稳定在 80% 左右, 且都能高效吸附阳离子染料 MB, 说明实验条件合理, 可操作性强, 重复性好。为进一步了解本实验在本科教学中的适应性, 研究小组邀请学院 10 位来自不同分数段的学生进行实验, 并对学时数进一步评估。结果表明: 在实验学时内, 所有学生均能完成各项实验操作, 获得有效实验数据。在实验过程中, 不仅是组内合作, 尤其是小组间的数据共享可以高效率地完成对照实验, 培养学生的团结合作意识, 锻炼学生横向分析数据和得出结论的能力。

综上所述, 本实验成本合理、产品易制备、产率高、重现性好, 适合在本科实验教学中开展。作为一个综合实验, 本实验适合对大三年级的学生进行开设, 涉及聚合物的合成、吸附应用以及多种仪器表征等, 可以通过实验加深学生对知识点的理解、仪器设备的使用和数据的处理分析。

5 结语

三嗪基多孔聚合物的合成及其染料吸附性能综合实验立足功能高分子材料的学科前沿, 使用碘化钾作为催化剂, 将三聚氯氰与碳酰肼发生亲核取代反应的时间缩短为 3 h, 得到聚合物 P(CC-CH), 并对其进行表征和染料吸附性能测定, 结果表明 P(CC-CH) 能有效吸附阳离子染料 MB。整个

实验设计严谨、操作简便、训练内容全面、时间和成本合理, 适用于本科实验教学。

本综合实验紧扣化学类课程教学内容要求, 使学生不但能掌握新材料的常用制备方法、表征分析手段和评价测试技术, 提高学生的实践动手能力, 而且能将理论和实践相结合。该实验围绕多孔材料领域的研究热点, 深度融合了化学、材料、环境等领域的相关知识, 使学生对染料废水处理有所了解, 引导学生将课本知识与生活中的环境污染问题结合起来, 从而培养环保意识、创新能力和科学思维。

参考文献

- 薛飞华, 朱宝玉. 染料废水处理技术方法的研究. 环境与发展, **2019**, 31(7), 91–93.
- 张树永, 朱亚先. 新时期我国高校化学类专业建设的挑战与对策. 中国大学教学, **2018**, (3), 25–29.
- Katheresan, V.; Kansedo, J.; Lau, S. Y. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: a review. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2018**, 6(4), 4676–4697.
- Liu, M.; Guo, L.; Jin, S.; Tan, B. Covalent triazine frameworks: synthesis and applications. *J. Mater. Chem. A*, **2019**, 7(10), 5153–5172.
- Dong, B.; Wang, W. J.; Xi, S. C.; Wang, D. Y.; Wang, R. A carboxyl-functionalized covalent organic framework synthesized in a deep eutectic solvent for dye adsorption. *Chem. Eur. J.*, **2021**, 27(8), 2692–2698.
- 徐琛, 付县, 喻桂朋, 潘春跃. 三嗪基共价微孔有机聚合物的研究进展. 高分子通报, **2018**, (6), 72–84.
- Gu, Q.; Gao, Z.; Xue C. Self-sensitized carbon nitride microspheres for long-lasting visible-light-driven

- hydrogen generation. *Small*, **2016**, 12(26), 3543–3549.
- 8 Xue, R.; Guo, H.; Wang, T.; Wang, X.; Ai, J.; Yue, L.; Wei, Y.; Yang, W. Synthesis and characterization of a new covalent organic framework linked by —NH— linkage. *Mater. Lett.*, **2017**, 209, 171–174.
- 9 Shao, L.; Li, Y.; Huang, J.; Liu, Y. N. Synthesis of triazine-based porous organic polymers derived N-enriched porous carbons for CO₂ capture. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2018**, 57(8), 2856–2865.
- 10 Zhao, H.; Jin, Z.; Su, H.; Jing, X.; Sun, F.; Zhu, G. Targeted synthesis of a 2D ordered porous organic framework for drug release. *Chem. Commun.*, **2011**, 47(22), 6389–6391.
- 11 袁宁, 冯利利, 龚宝林. 多孔材料实验教学研究评述. 实验技术与管理, **2020**, 37(4), 201–204.
- 12 杨晓慧. 高等教育“三全育人”: 理论意蕴、现实难题与实践路径. 中国高等教育, **2018**, (18), 4–8.
- 13 潘玉珍, 王秀云, 宿艳, 田福平, 徐铁齐, 姜文凤. 基础化学实验课程思政建设的探索. 大学化学, **2021**, 36(3), 16–21.
- 14 郑丹丹, 李仪鑫, 毕进红, 方元行. 微观形貌调控对 g-CN 光催化性能影响的综合实验设计. 实验技术与管理, **2022**, 39(5), 180–184.
- 15 邢其毅, 裴伟伟, 徐瑞秋, 裴坚. 基础有机化学 (第四版, 下册). 北京: 北京大学出版社, **2017**.
- 16 Li, Y.; Yang, C. X.; Qian, H. L.; Zhao, X.; Yan, X. P. Carboxyl-functionalized covalent organic frameworks for the adsorption and removal of triphenylmethane dyes. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2019**, 2(11), 7290–7298.
- 17 Tan, W.; Wu, X.; Liu, W.; Ye, F.; Zhao, S. Synchronous construction of hierarchical porosity and thiol functionalization in COFs for selective extraction of cationic dyes in water samples. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, 13(3), 4352–4363.
- 18 Wang, T.; Kailasam, K.; Xiao, P.; Chen, G.; Chen, L.; Wang, L.; Li, J.; Zhu, J. Adsorption removal of organic dyes on covalent triazine framework (CTF). *Micropor. Mesopor. Mater.*, **2014**, 187, 63–70.
- 19 Simonin, J. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chem. Eng. J.*, 2016, 300, 254–263.
- 20 范艳, 侯博. 金属有机框架(MOFs)材料在染料吸附领域的研究进展. 化学世界, **2022**, 63(3), 178–184.