

以学定教，融教于研 ——微塑料废弃物制备碳量子点的综合实验设计

庄淑婷*, 赵丽达

中国人民大学化学与生命资源学院, 北京 100872

摘要: 微塑料污染已成为全球环境问题, 将其转化为碳量子点为污染治理提供了创新思路。本实验采用水热法和灼烧法制备碳量子点, 并对其光学性能进行系统分析。同时, 研究了 Fe^{3+} 对碳量子点荧光效果的影响。实验内容涵盖了制备、性能分析及 Fe^{3+} 检测等, 操作简便, 融合了有机化学与环境化学, 增强了实验的趣味性与教育价值。

关键词: 微塑料; 碳量子点; 水热法; 灼烧法

中图分类号: G64; O6

Teaching through Research: A Comprehensive Experiment on Carbon Quantum Dots from Microplastic Waste

Shuting Zhuang*, Lida Zhao

School of Chemistry and Life Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China.

Abstract: Microplastic pollution has become a global environmental issue, and transforming it into carbon quantum dots (CQDs) offers an innovative approach to pollution control. In this experiment, CQDs were synthesized using hydrothermal and calcination methods, and their optical properties were systematically analyzed. Additionally, the effect of Fe^{3+} on the fluorescence properties of the CQDs was investigated. The experiment covers the preparation, performance analysis, and Fe^{3+} detection, with a simple and practical procedure. It integrates organic chemistry and environmental chemistry, enhancing the experiment's engagement and educational value, helping students better understand and apply theoretical knowledge while fostering innovation and practical skills.

Key Words: Microplastic; Carbon quantum dots (CQDs); Hydrothermal; calcination

随着现代化进程的加快和工业水平的提高, 塑料制品因其轻质、低成本、化学惰性强以及适应性广泛等独特优势, 已在工业、农业、交通运输、建筑、包装等众多领域得到广泛应用^[1]。然而, 塑料制品的广泛应用也带来了严重的环境问题, 使用后的塑料产品大多被作为废品送入垃圾焚烧厂, 无法得到有效利用; 部分未被焚烧的塑料则残留在环境中, 难以处理, 最终在物理、化学和生物等作用分解为小尺寸的塑料碎片。微塑料是一种直径小于5 mm的塑料颗粒^[2], 由于尺寸微小、比表面积大、易于吸附等特征, 其对生物与环境的毒害效应更加突出。研究表明, 微塑料可以影响生物的行为、摄食率、生长发育和繁殖能力, 甚至可能导致生物死亡^[2]。此外, 微塑料进入生物体后, 可能沿食物链传递至人体, 进入人体后通过循环系统在特定组织富集, 进而可能引发内分泌紊乱、呼吸系统等疾病, 甚至具有潜在的致癌风险^[3]。

收稿: 2024-12-02; 录用: 2025-02-14; 网络发表: 2025-05-19

*通讯作者, Email: zst@ruc.edu.cn

基金资助: 区域环境安全全国重点实验室专项经费(24K24ESPCT); 中国人民大学本科教育教学改革研究项目(JYXM2024044)

尽管微塑料对环境和健康的危害受到广泛关注,但作为有机大分子,其含碳量高,结构中富含多种官能团,仍具备资源化利用的潜力。近年来,一些研究开始探讨微塑料对环境总有机碳(TOC)的贡献^[4],以及老化后的微塑料其表面丰富的官能团对水环境中微量有毒有害物质的富集作用^[5]。目前对其潜在应用的探索相对较少,因此,如何有效将微塑料资源化是一个亟待解决的重要课题。

碳量子点(CQDs)是一类直径小于10 nm、近球形的零维半导体纳米晶体^[6],材料来源广泛、毒性低,近年来已成为研究热点。2023年诺贝尔化学奖聚焦量子点的研究,进一步凸显了此类材料在科学领域的重要性。碳量子点凭借其出色的光学稳定性和良好的生物相容性,使其在生物成像、光催化、光电等领域展现了广泛的应用前景^[7]。目前,碳量子点的常见前驱体包括粗煤烟、淀粉、柠檬酸等富含碳元素的物质,然而作为有机高分子材料的塑料亦显示出制备碳量子点的潜力。已有研究表明,利用废弃的大块塑料碎片可成功制备碳量子点^[8-12],这说明塑料作为碳量子点前驱体具有可行性。然而,现有研究中使用的塑料碎片大多尺寸大于5 mm,这使得炭化过程效率偏低,资源利用率不高。相比之下,微塑料作为一种尺寸更小且在环境中广泛存在的废塑料形式,具有独特的优势。微塑料可以直接作为碳量子点的前驱体,避免了对大块塑料进行破碎处理,从而降低了能耗并提高了资源利用效率。因此,利用微塑料制备碳量子点,可被考虑用于综合实验的设计中。此方法不仅为微塑料的回收和再利用提供了新的技术路线,还能在一定程度上缓解其对生态环境的危害。

本实验教学强调内容的前沿性与实践性,注重理论与实践的结合,致力于提升学生的实践能力与自主学习能力,切实符合《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》的要求。教学过程中融入环境化学、有机化学等相关内容,并在实验结束后介绍该领域的最新研究进展,旨在培养具备实践能力的高素质人才。

基于前期研究成果,结合国家标准和新时代教育要求,我们设计了“基于微塑料颗粒制备碳量子点的综合化学实验”。该实验通过水热法和灼烧法制备碳量子点,检测其荧光特性,并研究其对重金属离子的反应。通过优化实验流程,降低了操作难度与风险,使学生能够更安全地参与实验过程。为了使实验更具教育意义,首先要求学生查阅相关资料,了解微塑料污染的危害及碳量子点的性质。带着问题进入实验,学生不仅能加深对学科前沿问题的理解,还能拓展对全球微塑料污染问题的认识,从而探索可能的解决思路。此外,实验注重培养学生的创新思维和动手能力。通过引导学生利用碳量子点作图,帮助他们更深入地体会化学与现实生活的紧密联系。整体而言,本实验旨在激发学生对化学实验的兴趣,并在学术和实践中全面提升他们的综合素质。

1 实验教学目标

(1) 知识方面:学生将深入了解全球微塑料污染现状及其对环境和健康的影响,掌握碳量子点在生物成像、光催化等领域的广泛应用前景;系统学习利用微塑料制备碳量子点的方法,熟悉碳量子点的表征技术及相关仪器的工作原理。

(2) 能力方面:培养学生的文献查阅、资料整合能力以及基于问题的分析和解决问题的能力;掌握实验设计、数据采集与处理(包括Origin软件的使用)等科研基本技能,增强理论知识在实验观察和结果分析中的应用能力。

(3) 素养方面:通过实验教学,培养学生严谨务实的科学态度和实验操作中的安全环保意识;增强学生对化学在社会和环境问题中的重要作用的认知,激励他们以创新思维和化学知识助力社会可持续发展。

2 实验原理

根据实验原料的性质与制备策略,碳量子点的制备方法可分为自上而下法和自下而上法两大类。自上而下法通常以淀粉、粗煤烟等有机大分子为原料制备碳量子点;而自下而上法则以糖类、醇类等小分子为前驱体生成碳量子点^[13]。在本实验中,选择了微塑料这一典型的有机大分子作为原料。

水热法通过提供高温高压条件, 改变水的溶解特性和反应活性, 从而促进微塑料中聚合物键的断裂与水解。这一过程使微塑料分解为更小的碎片, 并释放出碳量子点。灼烧法, 也称为热解法, 是一种通过高温处理塑料材料的方法, 以破坏其高分子结构。在控制合适的温度条件下, 这种方法可以使微塑料表面碳化并进一步分解并生成碳量子点。

3 试剂与仪器

3.1 试剂

本实验所需主要试剂如表1所示。

表1 所需主要试剂

试剂名称	纯度/目数	生产厂家
FeCl ₃ ·6H ₂ O	分析纯	上海麦克林生化科技股份有限公司
PE	150目	东莞市恒丽新材料
PP	150目	东莞市恒丽新材料

3.2 仪器

本实验所用仪器如表2所示。

表2 所用主要仪器

仪器名称	仪器型号	生产厂家
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9140A	上海精宏实验设备有限公司
程控箱式电炉	SXL-1216	上海精宏实验设备有限公司
电子天平	FA2004	上海舜宇恒平科学仪器有限公司
反应釜	PPLKH-50	西安长仪仪器设备有限公司
三维荧光激发发射-同步吸收光谱仪	Aqualog UV-800-C	日本Horiba
紫光检测灯	LUYOR-3108	路阳仪器上海公司

4 实验内容

4.1 碳量子点的制备

(1) 水热法。

如图1所示, 称取0.1 g聚乙烯微塑料于反应釜内胆中, 后向其中加入25 mL去离子水, 装好反应釜后放置于电热恒温鼓风干燥箱内。以5 °C·min⁻¹的升温速率加热到180 °C, 并保温5 h, 随后自然冷却至室温。打开反应釜, 将内胆中的溶液用0.22 μm的水系滤膜过滤, 用血清瓶收集滤液, 得到含有碳量子点的去离子水溶液。随后, 将反应釜内胆中的残余固体置于电热恒温鼓风干燥箱中, 在70 °C下烘干, 收集烘干后的固体并计算反应前后固体质量的变化, 以此计算碳量子点的收率。

(2) 灼烧法。

如图2所示, 称取2 g聚丙烯微塑料于陶瓷坩埚中, 后将其置于程控式电炉中, 以5 °C·min⁻¹的升温速率加热到300 °C保温1 h, 并自然冷却; 待样品冷却后向盛有被灼烧样品的坩埚中加入10 mL去离子水, 并进行超声处理1 h。超声处理结束后, 将坩埚中的溶液用0.22 μm的水系滤膜过滤, 用血清瓶收集滤液, 得到含有碳量子点的去离子水溶液。接着, 将坩埚中的残留固体放入电热恒温鼓风干燥箱中, 在70 °C下烘干, 收集烘干后的固体并计算反应前后固体质量的变化, 从而得出碳量子点的收率。

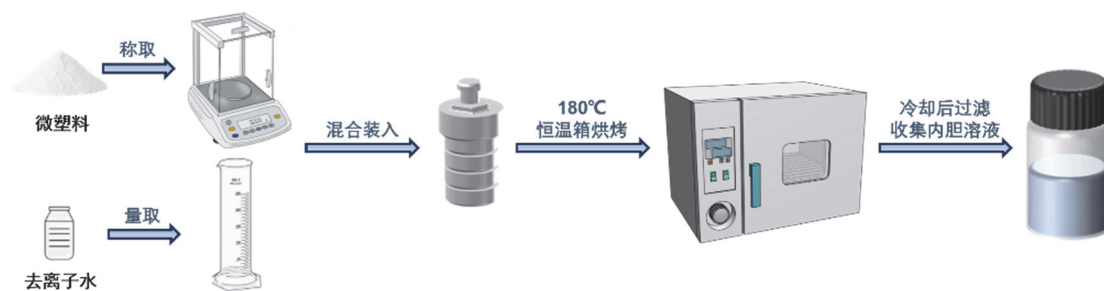


图1 水热法制备碳量子点的流程

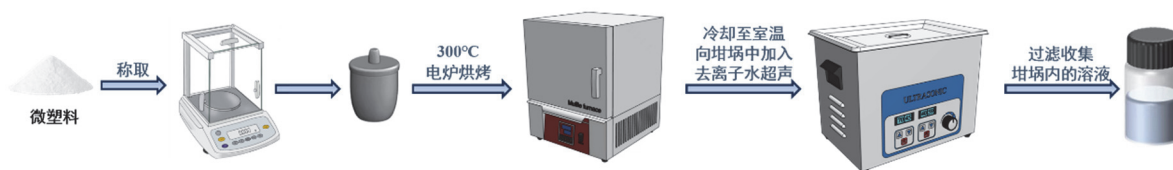


图2 灼烧法制备碳量子点的流程

4.2 碳量子点的荧光检测

由于碳量子点具有独特的电子结构和表面性质，在紫外光照射下，通过辐射复合过程捕获并释放光子，可展现出显著的光致发光特性。将血清瓶内的反应溶液置于紫外灯下照射，如果肉眼能够清晰观察到溶液产生明亮的蓝色荧光，这表明碳量子点的光致发光现象已成功显现。由此可验证，通过本综合实验提供的水热法和灼烧法，能够有效制备出具有光致发光性能的碳量子点。

取利用微塑料制备的碳量子点溶液，使用三维荧光激发发射-同步吸收光谱仪分别检测其激发光谱和荧光发射光谱。从所得数据中，不仅可以观察到两种方法制备的碳量子点的光谱特性，还能够分析二者的荧光强度，全面评价其光学性能。

4.3 碳量子点的淬灭实验

取利用微塑料制备的碳量子点溶液1 mL，稀释并定容于250 mL容量瓶中。随后，取20 mL稀释后的碳量子点溶液，分别转移至两个血清瓶中。接着，向其中一个血清瓶中加入5 mL浓度为 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Fe^{3+} 溶液，另一个血清瓶中加入5 mL去离子水，混匀后超声处理10 min。最后，在紫外灯下再次观察两瓶溶液的荧光发光变化。

5 结果与讨论

5.1 荧光检测

图3为利用微塑料制备的碳量子点溶液，其中A为去离子水，用紫外灯照射可见无荧光，B、C、D为使用水热法制备的碳量子点，E、F、G为使用灼烧法制备的碳量子点，在紫外线照射下，均可见明显的蓝色荧光，说明通过水热法与灼烧法可成功制备碳量子点，并且可发出蓝色荧光。经计算水热法制备的碳量子点的产率为15%–20%，而灼烧法制备的碳量子点产率则为3%–7%。

5.2 发射波长分析

利用三维荧光激发发射-同步吸收光谱仪对所制备的碳量子点进行了激发光谱和荧光发射光谱的检测。图4A为利用聚乙烯微塑料制备的碳量子点的激发光谱和荧光发射光谱；图4B为利用聚丙烯微塑料制备的碳量子点的激发光谱和荧光发射光谱。

由图4A可知，聚乙烯微塑料制备的碳量子点的主荧光峰位于激发波长(λ_{EX}) 308 nm和发射波长(λ_{EM}) 423 nm；此外，还存在明显的荧光峰，分别位于 λ_{EX} 242 nm/ λ_{EM} 413.8 nm和 λ_{EX} 266 nm/ λ_{EM} 294.97 nm。由图4B可知，聚丙烯微塑料制备的碳量子点的主荧光峰位于 λ_{EX} 302 nm和 λ_{EM} 423 nm，其位置

接近聚乙烯样品的主峰；其他明显的荧光峰分别为 λ_{EX} 245 nm/ λ_{EM} 418.4 nm和 λ_{EX} 269 nm/ λ_{EM} 290.44 nm。

值得注意的是，聚乙烯微塑料制备的碳量子点在 λ_{EX} 242 nm/ λ_{EM} 413.8 nm处的荧光强度较强，而聚丙烯微塑料制备的碳量子点在 λ_{EX} 269 nm/ λ_{EM} 290.44 nm处表现出更高的荧光强度，二者在荧光强度上存在显著差异。

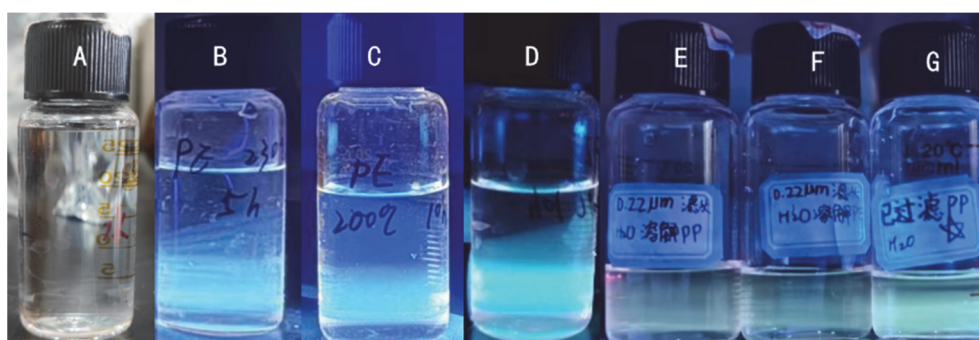


图3 利用微塑料制备的碳量子点溶液

A: 去离子水; B-D: 水热法; E-G: 灼烧法

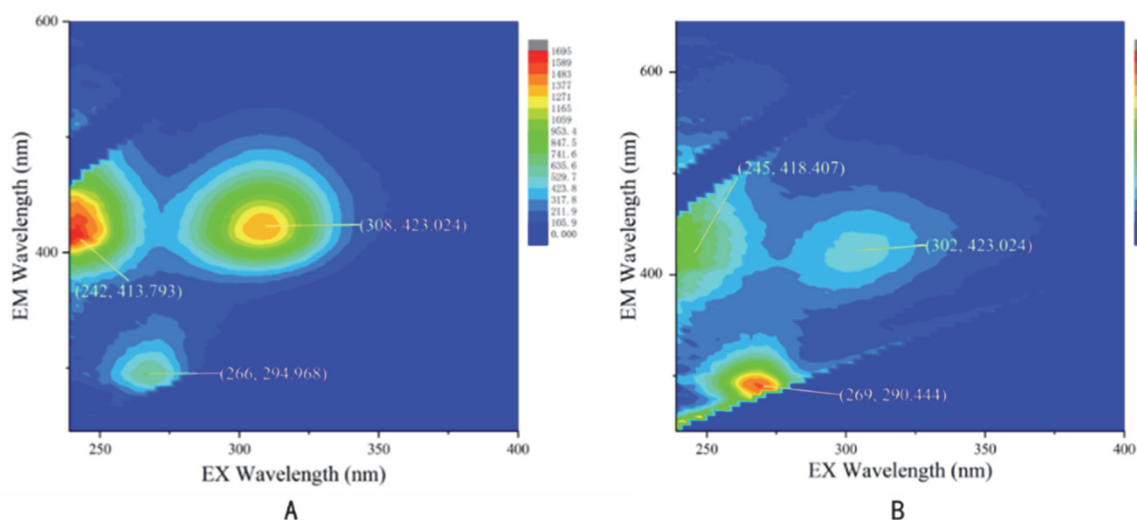


图4 聚乙烯(A)和聚丙烯(B)微塑料制备的碳量子点的激发光谱和荧光发射光谱

5.3 碳量子点的淬灭分析

图5展示了加入不同溶液后碳量子点溶液在自然光和紫外灯条件下的表现。其中，A图为加入5 mL去离子水的碳量子点溶液在自然光下的状态，B图为加入5 mL 0.1 mol·L⁻¹ Fe³⁺溶液的碳量子点溶液在自然光下的状态，C图为加入5 mL去离子水的碳量子点溶液在紫外灯下的状态，D图为加入5 mL 0.1 mol·L⁻¹ Fe³⁺溶液的碳量子点溶液在紫外灯下的状态。由图可见，加入Fe³⁺后，碳量子点溶液的荧光明显淬灭。由图可知，碳量子点溶液加入Fe³⁺发生了淬灭。此前已有相关研究表明Fe³⁺会与碳量子点表面的一OH等官能团发生配合作用。在此过程中，激发态电子由碳量子点向Fe³⁺转移，进而导致碳量子点荧光强度的降低^[14,15]。因此该实验现象该研究结论相一致，可以利用碳量子点来检测水体中Fe³⁺的存在可能性。

5.4 趣味性互动

取适量利用微塑料制备的碳量子点溶液，将其转移到移液枪中。然后，通过移液枪将碳量子点

溶液精准地滴加在黑色塑料薄膜上,利用点滴的方式进行创作。例如,图6展示了使用碳量子点溶液绘制的“人民大学”英文缩写“RUC”,A图为自然光条件下的“RUC”图案,B图为在紫外光照射下的“RUC”图案,其可显现出亮丽的荧光效果。

此步骤不仅为实验增添了艺术性,还可以在学生成功制备出碳量子点后,鼓励他们自由创作。这一过程能增强实验的趣味性和参与感,使学生在科学实验中感受到探索与创造的乐趣,同时也加深他们对碳量子点光学特性的理解。

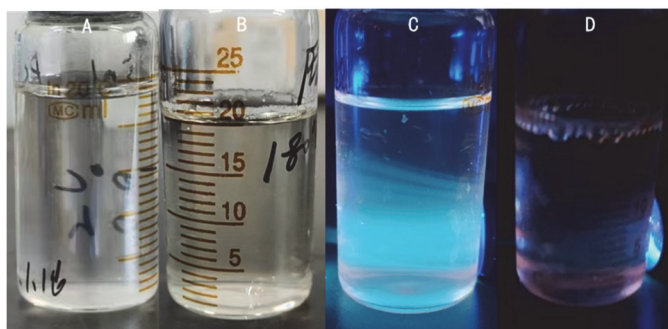


图5 碳量子点溶液在自然光(A、B)和紫外灯(C、D)下对 Fe^{3+} 离子响应的荧光特性

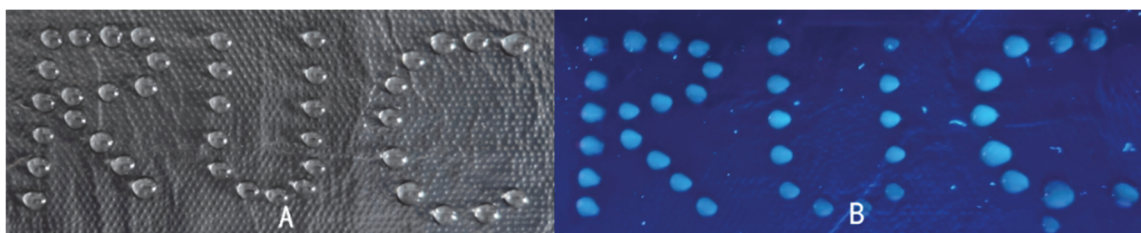


图6 自然光(A)和紫外光(B)下的“RUC”图案

6 思考题

- (1) 利用微塑料可成功制备碳量子点? 请列举其他可以用来制备碳量子点的材料。
- (2) 利用微塑料制备碳量子点的优点有哪些?
- (3) 水热法与灼烧法制备的碳量子点是否存在性质差别?
- (4) 聚丙烯与聚乙烯用于制备碳量子点的差别如何产生?
- (5) 碳量子点溶液用紫外灯照射多展现蓝色荧光,若改变溶剂,会不会显示出其他颜色?
- (6) 碳量子点在加入 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 后会淬灭,这种现象在现实生活中可以有哪些应用?
- (7) 所制备的碳量子点溶液在紫外线照射下的荧光强度与哪些因素有关?

7 注意事项

- (1) 使用马弗炉时要注意操作规范,在高温阶段不可打开炉门。
- (2) 反应釜使用前要检查设备是否完整,控制反应物的量,一般不要超过容积的一半,加热后等待反应釜完全冷却再打开。
- (3) 使用紫外灯时避免直接暴露。

8 教学组织建议

(1) 本实验以全球微塑料污染现状作为问题导向,以新型材料碳量子点的制备为解决方式,融合环境化学、有机化学等多学科知识,具有较强综合性,且原料来源广泛、价格低廉、操作简便,

将其选为本科实验, 可以增强本科生对化学实验的兴趣, 同时提升本科生的科研能力与科研素养。

(2) 建议本实验采用小组协作制, 每组由3–4名学生组成, 共同完成实验任务。学生需分工合作, 包括称量样品、仪器操作、数据记录与分析等环节。这种模式能培养团队协作能力, 同时兼顾个体动手实践机会。建议实验课每堂参与人数控制在20–25人, 以确保教师能够逐一指导。建议实验课安排6课时, 具体规划如下:

① 实验准备和水热法制备碳量子点: 2课时。学生完成实验背景学习及水热法样品准备和反应釜操作后, 将反应釜置于电热恒温鼓风干燥箱中进行反应。接下来, 教师将重点进行理论教学, 帮助学生深入理解实验原理及操作要点。在反应过程中, 实验助教将负责实时监控反应釜, 确保实验安全。由于反应釜需要完全冷却, 过滤和溶液收集工作将安排在次日进行, 学生将在助教指导下完成操作并妥善保存样品。

② 水热法产物检测与灼烧法制备碳量子点: 2课时。进行水热法制备碳量子点的荧光检测, 同时开展灼烧法的样品制备和加热操作。在灼烧法样品冷却期间, 通过光谱分析讨论水热法产物的光学性能。

③ 灼烧法产物检测与淬灭实验: 2课时。学生完成灼烧法制备产物的超声处理、过滤和荧光检测, 并开展淬灭实验。比较两种方法制备的碳量子点的荧光强度和淬灭效果, 分析实验结果并总结。

(3) 在进行正式实验前, 对学生进行马弗炉、烘箱操作流程与注意事项的培训, 同时令学生熟知反应釜操作注意事项, 避免危险的发生。

(4) 建议学生增加课外资料的查询, 寻找碳量子点产率的计算方法, 以及更高产率的实验条件。

9 实验教学成果

通过本实验教学, 学生全面掌握了利用微塑料制备碳量子点的两种主要方法, 即水热法和灼烧法, 深刻理解了不同制备条件对碳量子点性能的影响。同时, 学生通过荧光光谱分析和淬灭实验, 认识到碳量子点的独特光学特性及其在环境监测中的潜在应用价值。实验过程中, 学生不仅熟练操作了反应釜、紫外灯和光谱仪等仪器设备, 还掌握了Origin软件的基础数据处理能力, 显著提升了分析与解决问题的综合能力。此外, 通过利用制备的碳量子点进行荧光绘图活动, 激发了学生的学习兴趣 and 创意思维, 强化了化学与现实应用的联系。本实验以高度的趣味性和实践性, 有效提升了学生的科学素养和创新意识, 为培养能够应对未来环境挑战的复合型化学人才奠定了坚实基础。

10 结语

如今, 全球气候变化形势愈发严峻, 呈现出多端的态势, 环境污染机制也变得更加复杂。在微塑料对环境和人体的危害日益严重的当下, 研究如何将微塑料变废为宝无疑至关重要。我们紧密结合环境化学、有机化学等专业课程的知识精心设置实验, 利用水热法与灼烧法利用微塑料制备碳量子点, 成功将微塑料进行资源化利用, 并且本实验制备的碳量子点在紫外灯的照射下会发出荧光, 可以激发学生的实验兴趣, 在实践的同时让学生深入了解前沿的科学知识, 将理论知识切实地实践化, 提升学生的整体能力。

本综合实验具有操作简单、实用性强的显著特点。学生在了解碳量子点的制备过程的同时, 既增强了自身的实验操作能力, 又可以提升创造性思维与创新能力。这有助于培养学生的科学素养和创新精神, 为国家的科技创新和可持续发展培养更多优秀的人才。

参 考 文 献

- [1] Chen, X.; Wang, Y. D.; Zhang, L. *ChemSusChem* 2021, 14, 4137.
- [2] 刘沙沙, 付建平, 郭楚玲, 党志. 农业环境科学学报, 2019, 38 (5), 957.

- [3] 张思梦, 查金, 孟伟, 祁光霞, 任连海, 冯春华, 高鹏, 吕峥. 中国塑料, **2019**, *33* (4), 81.
- [4] Hu, D. F.; Shen, M. C.; Zhang, Y. X.; Zeng, G. M. *Sci. Total Environ.* **2019**, *657*, 108.
- [5] Zhuang, S. T.; Wang, J. L. *Sci. Total Environ.* **2023**, *897*, 165414.
- [6] 颜范勇, 邹宇, 王猛, 代林枫, 周旭光, 陈莉. 化学进展, **2014**, *26* (1), 61.
- [7] 李婷, 唐吉龙, 方芳, 房丹, 方铨, 楚学影, 李金华, 王菲, 王晓华, 魏志鹏. 功能材料, **2015**, *46* (9), 9012.
- [8] 苗彩琴, 王群, 朱孟春, 刘志博, 刘美雯, 赵伟, 吴晓宏. 化学教育(中英文), **2024**, *45* (6), 36.
- [9] 王凯, 康雨轩, 吴慧琳, 杨朝龙, 瞿伦君. 一种以废旧塑料为原料的碳点复合材料的制备方法: 中国, CN11 160 390. 9[P]. 2024-11-16.
- [10] Dai, L. L.; Karakas, O.; Cheng, Y. L.; Cobb, K.; Chen, P.; Ruan, R. *Chem. Eng. J.* **2023**, *453*, 139725.
- [11] Chen, Z.; Lu, W. Y.; Paneru, R.; Yang, Q.; Gong, W. B.; Tjeng, S. T.; Goroncy, A.; Dai, Q. L.; Zhang, J. W.; Kammen, D. M.; *et al.* *Chem. Eng. J.* **2024**, *499*, 156558.
- [12] Huang, J.; Yin, X. Y.; Yang, J. Y.; Guo, M. L. *Mater. Lett.* **2014**, *117*, 112.
- [13] 车望远, 刘长军, 杨焜, 李钊, 杨伟文, 田丰. 复合材料学报, **2016**, *33* (3), 431.
- [14] 童新阳, 葛子健, 刘煜超, 姚奇志, 李玲玲. 大学化学, **2022**, *37* (5), 2109082.
- [15] 刘雪萍, 杨娟, 白燕. 分析化学, **2016**, *44* (5), 804.