

物理化学实验教学改革：培养学生创新与实践能力

黄竹胜*, 薛伟, 常永正, 汪联辉, 罗志敏*

南京邮电大学化学与生命科学学院, 有机电子与信息显示国家重点实验室, 南京 210023

摘要: 传统的实验课程往往侧重于理论讲解和原理分析, 较少关注学生实践能力和创新思维的培养, 导致学生学习兴趣和主动性不足。本文以南京邮电大学物理化学实验课程为例, 探讨了该课程教学改革的必要性, 分析了传统教学模式的局限性, 并提出了多元化的改革措施, 强调理论与实践相结合, 旨在培养学生的创新思维和实践能力。

关键词: 物理化学实验; 教学改革; 创新思维; 实践能力

中图分类号: G64; O6

Teaching Reform in Physical Chemistry Experiments: Cultivating Students' Innovation and Practical Skills

Zhusheng Huang*, Wei Xue, Yongzheng Chang, Lianhui Wang, Zhimin Luo*

State Key Laboratory of Organic Electronics and Information Displays, School of Chemistry and Life Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China.

Abstract: Traditional experimental courses typically emphasize theoretical explanations and principle analysis, often neglecting the development of students' practical abilities and innovative thinking. This oversight can lead to diminished student interest and engagement in learning. This article examines the necessity for reform in the Physical Chemistry Experiment course at Nanjing University of Posts and Telecommunications. It analyzes the limitations of the traditional teaching model and proposes a range of diversified reform measures. By emphasizing the integration of theory and practice, this study aims to enhance students' innovative thinking and practical skills.

Key Words: Physical chemistry experiment; Teaching reform; Innovative thinking; Practical skills

在党的二十大报告中, 明确指出科技创新是我国现代化建设全局的核心。这一战略目标不仅要求高等教育在知识传授上有所突破, 更强调培养具备创新精神和实践能力的人才^[1]。随着全球科技的快速发展, 特别是在化学及相关领域, 教育体系面临着前所未有的挑战和机遇。因此, 高校教育必须与时俱进, 适应社会和行业对高素质人才的需求, 尤其是在具备创新能力和实践技能的人才培养方面^[2]。物理化学实验作为化学学科的基础课程之一, 其重要性不可小觑。通过研究物质的微观组成和结构, 这门课程不仅揭示了宏观物质的性质及其变化规律, 还为其他科学领域(如材料科学、生命科学和环境科学等)的发展提供了理论和实践基础, 推动了工程问题的解决与科技的进步。这种跨学科的应用使得物理化学实验成为连接基础研究与实际应用的重要桥梁^[3]。近年来, 随着学科交叉与应用技术的发展, 物理化学实验在新材料开发^[4]、药物递送^[5]和环境治理^[6]等领域的应用愈加广泛, 这进一步凸显了物理化学实验课程教学质量的重要性。

收稿: 2024-11-02; 录用: 2025-01-02; 网络发表: 2025-03-26

*通讯作者, Emails: iamzshuang@njupt.edu.cn (黄竹胜); iamzmluo@njupt.edu.cn (罗志敏)

基金资助: 南京邮电大学教学改革研究项目(JG11922JX71); 国家自然科学基金青年项目(82404567); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20240648)

然而, 在传统的“以教师为中心、依赖教材”的教学模式中, 尽管物理化学实验课程本质上是一门实验课程, 但教学重心往往偏向于实验的理论讲解和原理分析^[7]。教师通常花费较多时间讲解实验背后的科学原理、公式推导和实验设计思想(即“重理论”), 而在实验操作部分的讲解上, 往往仅限于对实验步骤、仪器操作等简单介绍, 忽视了学生在实验过程中如何进行主动探索和创新思考(即“轻实践”)^[8]。这种模式使得学生在实验过程中往往仅按部就班地完成操作, 而缺乏对实验现象的深刻理解和分析, 也无法培养他们的创新思维和实验设计能力。这种“重理论、轻实践”的教学模式不仅让学生对实验本身产生了应付的心理, 缺乏自主性, 还容易导致学生在实验结束后对其科学意义和实际应用缺乏深刻理解^[9]。尽管实验步骤得以顺利完成, 但学生对知识的掌握停留在表面, 缺乏通过实际操作和实践来深化对学科知识的理解与应用。当前南京邮电大学的物理化学实验课程仍沿用这种传统的教学模式, 存在“重理论、轻实践”的问题。这种“以教师为中心、依赖教材”的教学方式, 不仅难以激发学生的学习热情, 也使得他们在实践能力和解决复杂问题的能力上显得不足^[10]。针对这种情况, 许多高校已开始探索多样化的教学改革, 以提升学生的综合素质和创新能力, 适应现代科技发展的需求^[11]。近年来, 国内外研究表明, 多元化的教学方法, 如案例教学^[12]、翻转课堂^[13]和项目化学习^[14]等, 能够有效提升学生的学习兴趣和实践能力。例如, 国外一些大学在化学实验课程中引入跨学科合作和信息化工具, 取得了良好的教学效果^[15,16]。这些成功经验为本研究提供了有益的借鉴。

在本研究中, 我们通过对南京邮电大学物理化学实验课程的教学改革, 探索了适应现代教育需求的创新教学模式。通过引入案例教学^[12]、采用翻转课堂^[13]、项目化学习^[14]、建设信息化第二课堂^[15,16]、提升实践教学比例以及结合前沿科研成果等措施^[17-20], 旨在全面提升学生的实践能力、创新思维和科学研究能力。具体的改革举措包括增加实践环节、强化学生的自主性和创新思维、推动跨学科合作学习、实施反馈机制与持续改进。通过这些改革, 我们期望培养出更多具备创新思维和实践能力的科技人才, 为国家的科技进步和社会发展贡献力量。

1 物理化学实验内容和改革措施

在物理化学实验课程中, 传统的实验教学往往侧重于理论知识的传授和基础操作的练习, 缺乏对学生创新能力和实践能力的培养^[7-10]。为此, 我们需要对南京邮电大学各个实验项目进行深入分析(表1), 并提出相应的改革措施、收集实施反馈以及分析改革效果(表2), 以提升实验教学的质量和效果。

1.1 物理化学实验内容及教学痛点

表1总结了南京邮电大学物理化学实验课程的主要内容, 包括实验题目、实验内容和教学痛点。通过对这些实验的分析, 能够清晰识别出在教学改革过程中遇到的具体挑战。这些挑战不仅涉及学生在理论知识理解和应用能力方面的问题, 还包括教学模式转型带来的适应性问题。为了有效应对这些挑战, 教师需要采取针对性的教学策略, 以提高学生的参与度和实践能力, 确保物理化学实验课程的教学目标得以实现。

这些教学痛点主要体现在以下几个方面:

① 学生对理论知识的掌握不足, 许多实验依赖于一定的理论基础, 如恒温槽控温精度的研究、溶液中的吸附作用与表面张力的测定等。学生对相关理论的理解往往不够深入, 导致在实验中难以独立分析数据或形成正确的实验结论。

② 实验设计和数据分析的挑战, 如乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定和电导法测定表面活性剂的临界胶束浓度涉及较为复杂的数据分析。学生在分析反应速率和处理实验数据时, 往往缺乏实践经验, 可能导致理解不准确或对数据处理缺乏自信。

③ 教学模式转变的适应性问题, 如翻转课堂模式的实施, 虽然能够提升学生的自主学习能力, 但部分学生在课前学习时缺乏主动性, 导致课堂参与度不足, 影响学习效果。

表1 南京邮电大学物理化学实验内容及教学痛点

实验题目	实验内容	教学痛点
恒温槽控温精度的研究	研究恒温槽的控温精度，通过测量不同温度下的温度变化，评估其稳定性	学生对控温原理理解不够深入，难以在实验中独立分析数据，需提供更多的指导和示范
液体粘度的测定	测定不同液体的粘度，并分析其影响因素，如温度、压力和液体组成等	翻转课堂模式要求学生具备一定的自学能力，部分学生在课前学习时缺乏主动性，影响课堂效果
电导法测定表面活性剂的临界胶束浓度	通过电导法测定不同表面活性剂的临界胶束浓度，并探讨不同分子结构对其性质的影响	学生在小组合作中出现分工不均的情况，影响实验的顺利进行和结果的准确性
乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定	测定乙酸乙酯的皂化反应速率常数，运用动力学原理分析反应机制及影响因素	学生在分析反应速率和处理数据时缺乏实践经验，导致对结果的理解不够深入
溶液中的吸附作用和表面张力的测定	了解表面张力的性质，表面能的意义以及表面张力和吸附的关系，掌握最大泡压法计算溶液的表面张力和表面吸附量	学生对表面张力和表面吸附量的理论背景理解不足，导致在实验设计和数据分析中出现困难
燃烧热的测定	通过量热法测定化学反应释放的热量，并探讨在不同实验条件下燃烧热的变化规律，重点分析反应中热量的变化与反应物、生成物的关系	小组合作学习会遇到不同学生参与度不一的问题，如何调动每个学生的积极性是一个挑战
原电池电动势的测定	测定不同原电池的电动势，分析电池组成、浓度及温度对电动势的影响	信息化工具的使用要求学生具备一定的计算机操作能力，部分学生会和技术应用产生抵触或困难
黏度法测定高聚物的相对分子量	使用黏度法测定高聚物的摩尔质量，探讨分子量对物理性质(如流动性和溶解性)的影响，并结合实际应用分析	与行业专家的讲座可能面临时间协调困难，同时学生对实际应用的理解仍需深入，需加强对案例的引导

表2 南京邮电大学物理化学实验改革实例、实施反馈及改革效果

实验题目	改革实例	实施反馈	改革效果	学时数
恒温槽控温精度的研究	在细胞培养实验中，温度波动可能导致细胞生长的不稳定，进而影响实验结果的可重复性。在教学中，安排学生模拟不同温度变化对细胞生长的影响，探讨温度波动对实验的潜在风险，并设计解决方案，如使用不同的隔热材料来提高恒温槽控温精度	学生通过实验报告分析了不同温度条件下细胞代谢的变化，增强了对控温精度的理解	大部分学生能够清楚识别温度波动对细胞生长的影响，并提出具体改进方案	6
液体粘度的测定	在实验中，学生选择不同的液体(如油、水、酒精、糖溶液等)，以扩展实验的样品范围并提高实验的多样性。通过控制不同的温度和浓度条件，比较它们的粘度变化。每组学生负责数据记录、操作和分析，最后分享结果	学生通过比较不同液体在不同条件下的粘度，理解了温度和浓度对粘度的影响，同时在跨学科讨论中提高了实验设计和数据分析能力	通过跨学科合作，学生在讨论中提出了多种创新的实验方案，提升了团队合作能力和跨学科知识的应用能力	4
电导法测定表面活性剂的临界胶束浓度	学生在实验前进行表面活性剂在清洁剂、乳化剂等领域的应用研究，并在实验中使用电导法测定不同浓度下的临界胶束浓度。学生通过图表展示浓度与电导率的关系，分析胶束的形成过程	学生不仅能通过实验验证理论知识，还能通过与实际应用案例的结合，理解临界胶束浓度的实际意义	学生在实验报告中展示了对电导法和表面活性剂应用的深刻理解，增强了他们的创新思维	6

(待续)

(续表2)

实验题目	改革实例	实施反馈	改革效果	学时数
乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定	通过翻转课堂模式, 学生在课前自主学习反应速率常数的相关理论, 课堂上设计并讨论不同条件(如温度、浓度)对反应速率的影响, 学生还可通过视频动画直观理解反应机理	学生在小组中进行合作学习, 设计了多样的实验条件, 并通过数据分析得出反应速率常数的值	大部分学生能够有效计算反应速率常数, 且在讨论中展现了批判性思维	7
溶液中的吸附作用和表面张力的测定	鼓励学生在实验设计中选择不同的溶剂。例如, 学生可以选用水、有机溶剂(如醇类、酮类)或它们的混合溶液, 采用最大泡压法测定不同溶液的表面张力和表面吸附量, 并观察其变化趋势	学生通过文献调研和实际操作, 探索了吸附作用与表面张力在油水分离和石油污染物去除等领域的应用	学生在实验报告中总结了吸附作用和表面张力的应用价值, 并提出了改进方案, 进一步提升了他们的创新能力	5
燃烧热的测定	在测定不同材料(如木材、煤、塑料等)的燃烧热时, 结合全球能源问题讨论, 学生能够理解燃烧热测定在能源开发中的应用。例如, 通过比较不同材料的燃烧热, 学生了解哪些材料更适合用于高效能源利用	学生通过自主设计燃烧实验, 探讨了材料对燃烧热的影响	学生对燃烧热测定的应用意义有了更深刻的认识, 增强了他们的社会责任感	7
原电池电动势的测定	学生在实验中选择不同的电池类型(如锂电池、铅酸电池、磷酸铁锂电池等), 分析其电动势、容量和循环寿命。通过小组合作, 学生能够深入研究电池性能并将实验结果与理论知识结合	小组合作加强了学生的团队精神, 并通过实验数据分析, 提升了他们对电池技术的理解	学生能够清晰地比较不同电池的优缺点, 并提出改进方案, 增强了他们的创新能力	5
黏度法测定高聚物的相对分子量	学生通过参与高聚合物的合成和特性测试, 了解摩尔质量对材料性能的影响。例如, 选择不同类型的高聚合物(聚乙二醇, 纤维素, 聚乳酸等)进行实验, 分析它们的摩尔质量与物理性质之间的关系	通过跨学科合作, 学生在实践中深入理解高聚合物的摩尔质量对材料性能的影响	学生能够根据实验数据有效总结摩尔质量与性能之间的关系, 提升了他们的实验设计能力和科学分析能力	8

④ 小组合作与分工问题, 如电导法测定表面活性剂的临界胶束浓度, 涉及小组合作。在实际操作中, 学生往往存在分工不均、合作不顺畅的问题, 从而影响实验效果和学习成果。

⑤ 信息化工具应用的挑战, 随着信息化教学手段的引入(如原电池电动势的测定实验中的计算机辅助工具), 部分学生对新技术产生抵触或操作困难, 从而影响实验进度和学习效果。

⑥ 实际应用与跨学科整合的困难, 某些实验如黏度法测定高聚物的相对分子量, 虽然有一定的应用背景, 但学生对行业实际应用的理解较为薄弱, 且与行业专家的讲座等内容结合时可能面临时间协调困难。

1.2 物理化学实验改革措施、实施反馈及改革效果

针对物理化学实验课程中存在的教学痛点, 我们进行了系统的改革, 并在此基础上实施了一系列具体的教学创新措施。表2列出了改革措施的具体实例, 收集了实施后的反馈, 并进行了效果分析。这些改革措施旨在提升学生的实践能力、创新思维, 以及促进跨学科合作与实际应用意识的培养。在所有实验项目中, 统一引入数据处理、分析软件(如Excel、Origin、GraphPad Prism等), 以帮助学生实时监测和分析实验数据。通过生成图表和曲线, 学生能够直观理解实验现象和数据趋势, 从而更有效地掌握数据处理和分析的技巧。数据分析软件不仅帮助学生快速识别数据中的规律, 还能促使他们进行更加细致和精准的实验设计, 提升其数据分析能力和实验结果的解读能力。此外, 改革还鼓励学生进行文献调研和跨学科合作。学生通过查阅相关文献, 了解实验背景和前沿研究, 能够

更加全面地理解实验原理和应用,从而加强理论与实践的结合。在跨学科合作中,学生有机会与不同学科的同学进行互动与交流,拓宽了视野,增加了对复杂问题的综合分析能力。调查反馈表明,学生在实验课程中的参与度和学习兴趣显著提升,尤其是在实验设计和问题解决方面表现出了更高的自主性和创新性。多数学生能够更好地掌握实验知识,并在课后表现出解决实际问题的信心与能力。通过这些改革举措,不仅提升了学生的实验技能,也有效促进了他们对实验背后理论的深刻理解。同时,学生在跨学科合作、创新思维以及实际应用能力方面有了显著提升,为未来的科研工作和职业生涯奠定了更坚实的基础。

2 结果与讨论

在教学改革实施后,通过问卷调查和访谈收集了学生的反馈数据。数据显示,在引入开放性实验和项目化学习后,86.7%的学生表示他们对物理化学实验的兴趣显著提高。许多学生反映,实验中的创新设计激发了他们的创造力,使他们在实践过程中变得更加积极主动。通过比较改革前后的实验技能水平评估,学生在操作技能、数据分析和结果解释等方面的能力显著提升。例如,在液体粘度测定实验中,90.0%的学生能够准确测得待测样品的粘度系数,相较于改革前的63.3%,准确率提高了26.7%。在电导法实验中,93.3%的学生能够准确测得待测样品的电导率,相较于改革前的76.7%,准确率提升了16.6%。这些数据表明,改革措施有效地提高了学生的实际操作能力。改革后的实验课程强调理论与实践的结合,学生在实验过程中能够更好地理解和应用相关理论。例如,在讨论恒温槽控温精度时,学生通过具体案例分析温度波动对细胞培养的影响,增强了他们对实验结果的理解。这种理论与实践相结合的教学方式,不仅帮助学生更好地掌握实验操作技能,还促进了他们将抽象的理论知识转化为实际操作能力。通过组织实验室开放日和跨学科合作,学生们能从不同学科的视角理解物理化学实验的实际应用。调查显示,90%的学生认为教学改革后的物理化学实验课程显著加深了他们对物理化学的理解,相较于改革前的50%,提高幅度达到40%。这不仅提升了他们的综合素质,也为未来的科研合作奠定了基础。改革还引入了翻转课堂、案例教学和信息化工具,这些创新教学方法得到了学生的广泛认可。在实施翻转课堂的实验中,90%的学生表示这种学习方式使他们在课前预习时更加主动,课堂讨论的质量显著提高(表3)。此外,学生在使用数据处理、分析软件(如Excel、Origin、GraphPad Prism等)进行实验结果处理时,能力也有了明显提升,许多学生开始主动探索更多的数据分析工具(如SPSS、MATLAB等)。

通过跨学科合作(如液体粘度测定和高聚物相对分子量测定等实验),学生在知识交流和团队协作方面表现出显著进展。不同学科背景的学生共同设计实验、探讨实验问题,彼此借鉴各自专业领域的知识,促进了跨学科思维的培养。例如,学生通过研究高聚物分子量对材料性能的影响,不仅深化了对物理化学原理的理解,还认识到这些知识在环保和材料科学中的应用。这一过程不仅帮助学生更好地理解物理化学原理,也增强了他们的创新思维和社会责任感。通过引入翻转课堂和自主设计实验方案,显著激发了学生的主动学习热情。例如,在乙酸乙酯皂化反应速率常数测定和溶液吸附作用测定实验中,学生自主选择实验变量、设计实验流程,并分析讨论实验结果。在这一过程中,学生不仅巩固了实验原理,还通过反馈不断完善实验设计,提升了数据分析和解决问题的能力。特别是在翻转课堂模式下,学生在课前自主学习并在课堂上积极参与讨论,使他们对实验原理有了更加深刻的理解,并能够将这些理论有效应用到实践中。将实验内容与现实中的热点问题相结合(如燃烧热测定和原电池电动势测定与可再生能源和电池技术问题的结合),显著提升了学生对实验的兴趣和实用性认识。这些实验不仅帮助学生理解基本的物理化学原理,还让他们看到这些原理在现实生活中的应用,尤其是在环境保护、能源开发和技术创新方面。此外,学生通过实际操作,不仅深化了对物理化学原理的理解,还增强了对能源效率、可持续发展和技术创新重要性的认知,进一步提升了他们的社会责任感。通过理论讨论和案例分析,学生能够更好地理解实验背后的理论原理。

例如, 在电导法测定表面活性剂的临界胶束浓度实验中, 学生不仅通过实验验证了理论知识, 还进一步理解了表面活性剂在清洁剂、乳化剂等实际应用中的重要性。通过这种方式, 学生能够将抽象的理论转化为具体的实验操作, 提升了他们的科学分析能力和创新思维。

表3 问卷调查、访谈及实验报告统计内容与学生的反馈数据

序号	问卷调查、访谈及实验报告统计内容	数据收集时间及方式	学生反馈数据	正向反馈百分比
1	教学改革后, 你对物理化学实验课程的兴趣有无提高?	问卷调查统计	有提高: 26人; 无提高: 4人	86.7%
2	液体粘度测定实验中能否准确得出待测样品粘度系数?	改革前实验报告 结果统计	能准确: 19人; 不能准确: 11人	63.3%
3	液体粘度测定实验中能否准确得出待测样品粘度系数?	改革后实验报告 结果统计	能准确: 27人; 不能准确: 3人	90.0%
4	电导法实验中能否准确得出待测样品的电导率?	改革前实验报告 结果统计	能准确: 23人; 不能准确: 7人	76.7%
5	电导法实验中能否准确得出待测样品的电导率?	改革后实验报告 结果统计	能准确: 28人; 不能准确: 2人	93.3%
6	物理化学实验课程有无加深你对物理化学的认识?	改革前访谈统计	有加深: 15人; 无加深: 15人	50.0%
7	教学改革后, 物理化学实验课程有无加深你对物理化学的认识?	改革后访谈统计	有加深: 27人; 无加深: 3人	90.0%
8	教学改革后, 你会不会主动去做课前预习?	问卷调查统计	会预习: 27人; 不会预习: 3人	90.0%
9	你会利用课余时间去参加学院的科研工作么?	改革前访谈统计	会参加: 3人; 不会参加: 27人	10.0%
10	教学改革后, 你会不会利用课余时间去参加学院的科研工作么?	改革后问卷调查	会参加: 15人; 不会参加: 15人	50.0%

尽管改革已取得初步成效, 但仍有改进的空间。部分学生反映, 在跨学科合作中存在沟通障碍, 建议未来可以引入更多的团队建设活动, 以促进不同学科学生之间的互动。最后, 建议将实验课程的学时从32学时增加至48学时, 为学生提供更多时间进行深入探索和讨论, 从而进一步提升学习效果。

3 结语

通过本次教学改革, 南京邮电大学的物理化学实验课程在提升学生实践能力和创新思维方面取得了显著成效, 目前有50%的同学利用课余时间参加学院的科研工作, 在读的本科生利用课余时间参与的科研工作已经发表在*Nature Communications*^[21]和*Nano Letters*^[22]等高水平学术期刊上。未来, 持续探索有效的教学改革路径, 以适应快速发展的科学技术需求, 将为培养更多高素质的人才奠定基础, 希望这些成果和讨论能够为其他高校的教学改革提供借鉴和参考。

参 考 文 献

- [1] 蒲清平, 黄媛媛. 重庆大学学报(社会科学版), 2022, 28 (6), 286.
- [2] 张宗益. 中国高教研究, 2022, No. 9, 7.
- [3] 刘绪, 刘城芳, 黄杰, 李祥春, 赖文勇. 大学化学, 2024, 39 (8), 112.
- [4] Pathak, D. K.; Rani, C.; Sati, A.; Kumar, R. *ACS Phys. Chem. Au* 2024, 4 (5), 430.

- [5] Mitchell, M. J.; Billingsley, M. M.; Haley, R. M.; Marissa E. W.; Nicholas, A. P.; Robert, L. *Nat. Rev. Drug Discov.* **2021**, *20*, 101.
- [6] Grassian, V. H. *J. Phys. Chem. C* **2022**, *126* (30), 12320.
- [7] 李猛, 蒙丽丽. 科教导刊, **2022**, No. 4, 180.
- [8] 陈义刚. 广州化工, **2023**, No. 10, 146.
- [9] 黄妙龄, 解庆范, 陈延民, 许妙琼, 肖春妹, 连小兵. 高教学刊, **2018**, No. 6, 105.
- [10] 郭铭笙, 林洁丽, 李杰森, 盛杰, 周容富. 创新教育研究, **2024**, *12* (9), 129.
- [11] 薛成龙, 郭瀛霞. 华东师范大学学报(教育科学版), **2020**, *38* (7), 65.
- [12] 杨炼. 教育进展, **2023**, *13* (5), 2468.
- [13] 张伟. 西南师范大学学报(自然科学版), **2020**, *45* (8), 125.
- [14] 何振芳, 肖燕, 马雪梅, 汤庆新, 龙银平. 高教学刊, **2023**, *9* (31), 74.
- [15] 浦晗. 黑龙江高教研究, **2022**, *40* (1), 8.
- [16] 戴伟芬, 汪燕. 黑龙江高教研究, **2022**, *40* (9), 66.
- [17] 李程锦. 高教探索, **2019**, No. 7, 1.
- [18] 薛冬峰, 苏良碧, 徐军. 无机材料学报, **2023**, *38* (3), 3.
- [19] 宋京润, 罗志敏, 黄竹胜. 福建师范大学学报(自然科学版), **2023**, *39* (4), 1.
- [20] 刘俊杰, 张颖, 罗志敏. 福建师范大学学报(自然科学版), **2024**, *40* (1), 1.
- [21] Huang, Z.; Huang, S.; Song, S.; Ding, Y.; Zhou, H.; Zhang, S.; Weng, L.; Zhang, Y.; Hu, Y.; Yuan, A.; *et al.* *Nat. Commun.* **2024**, *15*, 8692.
- [22] Huang, Z.; Song, J.; Huang, S.; Wang, S.; Shen, C.; Song, S.; Lian, J.; Ding, Y.; Gong, Y.; Zhang, Y.; *et al.* *Nano Lett.* **2024**, *24* (25), 7764.