

培养化学拔尖人才为导向的综合化学实验(I)教学改革探索

朱倩倩^{1,*}, 王稳²

¹郑州大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心, 郑州 450001

²河南警察学院刑事科学技术系, 郑州 450046

摘要: 针对综合化学实验(I)课程设立的目标和教学现状, 以培养化学学科拔尖人才、提升学生综合学术素养为导向, 本文提出将目前国内外流行的线上线下相结合的混合式教学模式引入到课程教学中。文章以“稳态瞬态荧光光谱”实验教学为例阐述了混合式教学在综合化学实验课程中的应用。在教学过程中, 将线上视频教学、演示实验和线下实际操作相结合, 并辅以口头报告、专题讨论等多种教学手段, 在丰富课程教学元素的同时充分调动了学生的学习兴趣。问卷调查结果表明, 大部分学生认为采用混合式教学的课堂对他们帮助很大, 对他们极具吸引力。

关键词: 综合化学实验; 线上教学; 教学模式; 实验教学改革

中图分类号: G64; O6

Exploration of Comprehensive Chemistry Laboratory (I) Teaching Reform Guided by the Aim of Training Talents in Chemistry

Qianqian Zhu^{1,*}, Wen Wang²

¹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education, College of Chemistry, Zhengzhou university, Zhengzhou 450001, China.

² Department of Forensic Science, Henan Police College, Zhengzhou 450046, China.

Abstract: Based on the establishment objective of comprehensive chemistry laboratory (I) and the current laboratory teaching situations, the blended teaching model combining online teaching with offline teaching was put forward, in order to train talents in chemistry and improve students' comprehensive academic ability. The blended teaching pattern in the application of comprehensive chemistry laboratory was presented, taking "steady-state and time-resolved fluorescence spectrum experiment" as an example. In the teaching process, online video teaching, demonstration experiment and offline practical operation were combined, supplemented with other teaching methods such as oral presentation, symposium, etc., which would fully mobilize students' interest and enrich the teaching elements. The questionnaire showed that most students believed that the online and offline combined teaching model was very helpful and attractive.

Key Words: Comprehensive chemistry laboratory; Online teaching; Teaching model; Laboratory teaching reform

化学是一门以实验为基础、理论与实验并重的学科, 化学专业的学生在培养过程中不仅需要掌握基础理论知识, 还需要进行大量的实验和科研训练, 实验教学对于化学专业人才培养十分重要。

收稿: 2021-11-10; 录用: 2021-12-17; 网络发表: 2022-04-21

*通讯作者, Email: zhuqian500@126.com

基金资助: 郑州大学教育教学改革研究与实践项目(2021ZZUJGLX124); 教育部社科研究基金青年基金项目(21YJC820056); 河南警察学院院级项目(HNJY-2021-40); 河南警察学院教学改革项目(SZ2021014)

目前,国内外一流高校的化学专业根据学生年级不同开设了相关的配套实验教学课程,美国化学会(ACS)发布的最新版《本科化学专业教育:学士学位的指导和评估规范》强调实验课程与专业课程的结合,规定了与专业课程体系相匹配的3个层次的实验课程,分别是引导性化学实验课程、基础性化学实验课程和深度化学实验课程。其中深度化学实验课程类似于本文所述的综合实验课程,该课程要求学生综合运用各种技能,每周在实验室工作的时间至少要达到6 h,需要独立设计实验方案、实施实验方案、分析实验数据,并能利用化学文献指导实验工作^[1]。以美国加州大学洛杉矶分校和约翰霍普金斯大学为代表的众多化学专业排名靠前的高校均采取了类似的化学实验教学方案^[2,3]。国内很多著名高校的化学专业均建立有完善的实验教学体系,并进行了众多实验教学改革和探索,例如北京大学、南京大学、南开大学、兰州大学、四川大学等知名高校及很多地方高校的化学专业,面向高年级的本科生均开设了综合化学实验课程,涉及到的实验内容和实施的具体方式虽不尽相同,但均是提升学生独立分析解决化学相关科学问题的能力,培养独立思考、开放创新的科学精神的重要环节。郑州大学化学学科创建于1956年,在长期的人才培养过程中,以“强调基础、突出重点、提高创新能力”为核心,按照基础实验-综合实验-开放实验-研究型实验四个层次推进实验教学,形成了提高-培优-早期介入科研的完整实验教学体系。根据学生的理论课程开设情况,先后设置无机化学实验(I)、无机化学实验(II)、有机化学实验(I)、有机化学实验(II)、分析化学实验、物理化学实验、综合化学实验(I)、仪器分析实验、综合化学实验(II)、化工基础实验等必修基础实验课程和探究型开放实验课程。在此基础上,学生将进入科研学术课题组开展两个学期的研究型的综合实验,将综合化学实验的教学活动进一步延伸,形成了一体化、多层次、重基础、求创新的实验教学体系。

郑州大学综合化学实验(I)课程开设于2017年,是一门面向化学、应用化学专业高年级本科生的重要专业必修基础实验课程。本课程旨在让学生了解目前先进的分析手段和先进的大型精密仪器,掌握仪器的工作原理和功能以及操作方法,能够独立操作仪器,对分析结果进行处理,并了解仪器日常维护的常识,为培养具有较高科研素养和实践能力的拔尖人才打下坚实的基础^[4]。综合化学实验(I)为学生进一步进行综合化学实验(II)及进入学术科研课题组开展研究提供了非常重要的支撑。高年级本科生在完成综合化学实验(I)的基础上,需要延伸到开放型综合化学实验(II)的实践学习。综合化学实验(II)是在前期实验课程的基础上,开设的开放创新型实验课程,跨越多个二级学科内容,涉及多个研究方向,以此提升学生综合运用所学知识解决实际问题的能力,建立科学的研究思维方法。综合化学实验(II)的训练过程中,学生要根据具体的研究需求借助大型仪器设备对材料结构、性能等进行研究,是对学生能否运用综合化学实验(I)中所学仪器分析方法及大型精密仪器操作技能灵活地用于实际研究的进一步检验。

1 综合化学实验(I)课程介绍

本课程依托于化学学院现有的大型精密仪器,结合化学专业拔尖学生培养要求,开设了粉末X射线衍射、等离子体原子发射光谱法测定矿泉水中的微量元素、稳态瞬态荧光光谱、高密度聚乙烯的拉曼光谱、离子色谱法测定水中阴离子、气相色谱-质谱联用测定水晶板中的邻苯二甲酸酯、有机化合物中元素含量分析、紫外可见漫反射光谱分析等实验,涉及X射线衍射分析、原子光谱分析、分子光谱分析、色谱分析、热分析、元素分析、质谱分析、电子显微分析等多种分析方法,涵盖了材料结构、形貌、含量、光谱性质、热稳定性等多方面、常用的表征技术。

为确保本课程教学活动高效、高质地开展,本课程采用小班独立授课方式,将学生分成若干小组,每组人数控制在4人以内,每个实验课程结束后,学生以小组为单位进行轮换。小班授课模式,确保在仪器室有限的空间内,所有学生均能高质量地参与课程。授课主要以大型仪器现场教学为主,为学生讲授相关的仪器分析方法、仪器构造、工作原理,演示实际样品测试的操作方法,讲解测试注意事项、相关分析方法的适用范围以及在实际的科研过程中的具体应用等内容。通过本课程的学习,使学生了解和掌握目前先进的分析手段和先进的大型仪器,使学生能够独立操作常用的分析仪

器,进一步巩固所学的理论知识和化学实验的基本知识和基本技能,并能够运用理论指导实验,培养严谨的科学作风和良好的实验素养,为综合实验能力的培养打下坚实的基础。

2 综合化学实验(I)教学现状

与普通化学实验、分析化学实验、有机化学实验等传统化学专业实验课程不同,综合化学实验(I)主要以相关仪器分析方法、仪器结构和工作原理讲解及实际样品分析测试为主。课堂上,以教师讲授为主、演示和实际上机操作为辅;由于仪器数量的限制,学生采取循环操作的方式进行实际上机操作。实验原理较抽象难懂,加上大型精密仪器多采用封闭式设计无法直观看到仪器的内部构造和工作状态,导致学生在课堂上的参与积极性不高、对授课的内容不容易理解掌握。与此同时,大型仪器的操作较复杂,需要注意的事项较多,学生很难在较短的时间内熟练掌握仪器操作要领。因此,十分有必要引入一种更加直观、有效的教学手段和方法,提升综合化学实验的教学效果,激发学生的学习兴趣。

3 混合式实验教学设计

互联网技术的飞速发展和智能手机的普及,为传统授课模式带来了新的机遇和改革思路,将现代信息技术引入传统的实验课堂,开展线上与线下相结合的混合式教学模式,取长补短,将会对提高学生在实验课堂上的抬头率和参与积极性、加强师生之间的互动、保障每个教学环节高效的开展起到重要作用^[5-7]。

“长江雨课堂”是学堂在线与清华大学共同研发的一款智能教学工具,简便易操作,只需要借助微信和Powerpoint软件就可以完成,教师可以按照原有的习惯利用PPT设计课程,将授课内容幻灯片、课堂互动、习题测评和作业融入到PPT中,通过微信公众号通知学生进行课前预习,课堂上可以开启直播授课功能,上课的同时也积累了线上课程资源,同时方便学生课下进行回看、复习^[8]。借助“长江雨课堂”,可以获得课前-课中-课后的教学大数据,所有教学过程全部留痕,自动对数据开展挖掘和算法训练,帮助师生之间进一步了解,促进课堂教学量化研究。

我们对综合化学实验(I)进行混合式教学改革的思路、设计方案以及线上线下混合式教学方式之间的关系采用框图方式进行了说明,如图1所示。在课前,可以采用线上方式向学生推送预习内容和相关线上学习资源,线上方式也为师生课前进行讨论交流提供了便捷的途径。课堂上,采用线上方式进行授课,一方面有利于借助多媒体资源讲解封闭仪器的内部结构、工作原理等难以在线下课堂直观讲解的内容,打破空间壁垒;另一方面线上授课时多样的互动环节有利于调动学生的学习兴趣,授课内容方便学生反复查看,穿插的答题环节也可以实时检验学生的掌握情况,为综合成绩的评定提供量化数据。线下课堂可以实现学生对大型精密仪器的近距离接触、仪器操作和实际样品的分析测试工作,让学生亲身体验仪器操作,解决实际样品分析测试中遇到的问题。与此同时,注重在混合式实验教学中融入课程思政,将专业教育与思想政治教育有机结合起来,发挥实验教学的立德树人作用。混合式实验教学方式可以充分发挥线上方式与线下方式的优势互补,不断提升实验课堂的教学效果,最大程度地发挥实验教学在化学拔尖人才培养中的重要作用。与理论课程的线上线下教学不同,实验课程的线上线下混合教学在线上和线下环节各有侧重,缺一不可,线上环节主要以复杂抽象的原理、难以直接观测的仪器内部构造等内容为主;线下课堂则是以学生要亲自动手操作的实验演示和具体实际样品分析测试为主,线上和线下环节的内容及授课顺序都有固定的教学设计,很难随意调整。

接下来,结合“稳态瞬态荧光光谱”实验,具体介绍混合式综合化学实验教学设计思路。

3.1 课前——推送优质教学资源,督促学生预习

课前,利用“长江雨课堂”插件为学生制作5-7页的预习内容,涵盖课程涉及的基态、激发单重态、激发三重态、发光现象的分类、非辐射跃迁和辐射跃迁途径等基础知识,让学生在课前预习阶

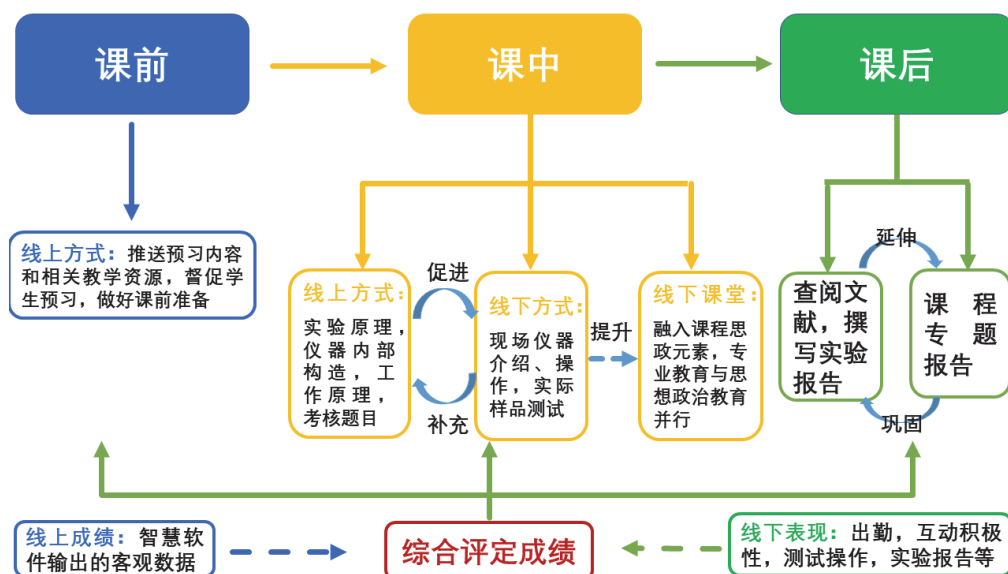


图1 混合式教学改革的思路、设计方案以及线上线下混合式教学方式之间的关系

段有针对性地掌握相关基础知识；将我校优秀的慕课资源——仪器分析课程中与本实验课程紧密相关的部分，内嵌在课前推送的线上资料中，学生可根据自身情况开展自主学习。同时，课前推送的线上资料中，可以设置一两道考核题目督促学生用心预习、避免课前预习形式化，也便于教师考查学生预习效果。

3.2 课中——在线直播授课和线下课堂相结合，增加互动，储备线上资源

课堂上，教师采用长江雨课堂直播方式进行授课，学生通过手机微信小程序进入班级学习，同时完成签到环节。

首先利用线上直播形式以图片的方式引出生活中常见的发光现象，提高学生的学习兴趣，通过限时答题的方式考查学生对于不同发光现象的分类了解情况，判断学生预习情况。对于分子荧光光谱的原理讲授，涉及到基态、激发单重态及激发三重态的概念，传统的实验课堂上，为了调动学生的参与性，考查学生对于普通化学原理及结构化学中相关内容的掌握情况，教师会提问学生这三个基本概念，但极少有学生主动回答问题。针对这种情况，教师可以借助长江雨课堂的弹幕功能，让学生通过匿名弹幕的方式回答问题，教师在智慧插件后台可以掌握每个学生回答问题情况，基于此有助于客观地评价学生预习的情况及在课堂上的表现。而在分子体系的荧光和磷光发射原理，二者之间的区别和联系，荧光发射的影响因素，结构与荧光性质之间的构效关系等内容的讲授过程中，可结合长江雨课堂的随机点名功能进行提问，一方面活跃课堂气氛，另一方面增强学生的参与性和专注力、调动他们学习的积极性。

仪器分析方法繁多，知识点细碎，学生掌握起来很吃力，再加上实验教学学生上机时间少、积极性不高的情况，导致学生无法把每种仪器分析方法系统地串联起来，根据实际需要选择合适的仪器分析方法更是无从谈起^[9,10]。在综合化学实验的课堂上，可以对相关知识及延伸内容进行展开，引导学生对不同仪器分析方法进行分门别类梳理、掌握。针对大型仪器构造复杂、封闭式设计以及工作原理抽象难懂的特点，将相关内容以多媒体动画或视频方式嵌入课件中，通过视听方式呈现给学生，通过加深学生的感观认识强化学生对所学知识的理解。

在使用长江雨课堂线上直播授课的基础上，结合线下课堂演示仪器操作和实际样品测试分析，这不仅可以增加课堂的多样性，提高学生的学习兴趣 and 参与度，而且可以向学生集中展示仪器分析方法原理、仪器功能及相关应用。正如开篇所言，本课程的目的在于强化化学专业学生对仪器分析理论课程的学习，以培养化学拔尖人才为导向拓宽高年级本科生的学术视野，为后续的学术深造打

下坚实的基础。因此,演示实验部分要求教师在进行教学设计时综合考虑,不要为了演示而演示,应该将相关前沿科学研究引入其中,比如由我国唐本忠院士首先提出并一直在国际上处于领先研究地位的聚集诱导发光概念(AIE)、在生物医学领域应用十分广泛的荧光成像技术、2008年获得过诺贝尔化学奖的绿色荧光蛋白研究工作等,从而真正实现设立课程的初心,让学生了解科学前沿,提升学术素养。

纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行。学生要真正达到独立操作仪器测试的目的,必须不断地进行实践。因此,针对每种仪器分析方法准备不同类别的实际样品,让学生轮流、独立操作仪器进行测试。一方面,可以锻炼他们根据实际样品独立分析选择合适测试方法,真正掌握仪器操作;另一方面,也有利于巩固学过的理论知识和实验操作。

3.3 将课程思政融入实验教学,发挥其立德树人作用

立德树人是教育的根本任务,在本课程的授课过程中,不仅要重视传授专业知识和学生专业能力的培养,而且要引导学生形成正确的人生观、世界观和价值观。因此,需要将课程思政融入到实验教学中,将思想政治教育与专业教育结合起来,充分发挥实验教学在立德树人为根本任务、三全育人为导向的人才培养中的作用。比如,在“稳态瞬态荧光光谱”实验教学中,向学生介绍首次由我国科学家唐本忠院士提出并在国际上获得同行认可的聚集诱导发光概念,为学生讲述唐本忠院士如何发现聚集诱导发光现象并提出这一概念,以及在整个过程中唐院士面对难以解释的、反常的实验现象所呈现的科研态度等。通过引入类似的课程思政实例,一方面激发学生强烈的爱国情怀和自豪感,另一方面鼓励学生向前辈科学家学习,无论是在日常的学习生活中还是在科学研究遭遇研究瓶颈时,都要保持积极乐观的态度,坚持实事求是、踏实勤奋、勇于创新的科研作风。

3.4 课后——调整考核方式,鼓励学生夯实基础、紧跟专业前沿

传统的实验课程中,不重实验过程、注重实验结果,对学生的上课过程缺乏客观的量化数据,课程结束后学生机械地搬抄实验原理、实验内容、操作步骤等形成实验报告,极大地限制了学生的主观能动性^[11]。通过长江雨课堂的大数据统计和分析功能^[12],可以获得客观数据定量反映学生的预习情况和在课堂上的表现;此外,结合本课程的特点,教师要求学生查阅与讲授的仪器分析方法相关的前沿工作,通过文献搜索、阅读,结合文献和课程内容撰写实验报告。这样一方面,可以改变传统实验课堂唯结果的现状;另一方面,督促学生掌握文献检索的技能,驱动学生更好地了解学术前沿、掌握所学仪器分析方法。目前,因为课时的限制,无法对这一环节进行展开,如果后续课时适当延长,可增加报告展示环节,让学生以PPT方式汇报,全面提高学生的综合实力。

4 混合式综合化学实验教学的实施情况和展望

4.1 混合式综合化学实验教学的实施情况

我们通过对综合化学实验课程的问卷调查,了解了学生对于混合式综合化学实验教学的各个环节的反馈。图2是2019级学生对于综合化学实验课程学习目标的反馈,有94.59%的学生期望能通过本课程的学习,巩固相关理论知识;有83.78%的学生期望借助此课程科研素质能够得到提升;此外有67.57%的学生期望动手能力和师生交流情况可以得到改善。说明学生对于本课程的需求已不仅仅是单一理论知识和实验技能的输入,而是综合科研素养的提升,这与信息化背景下化学拔尖人才的培养目标相契合。通过图3对于课前预习的调查结果发现,有89.19%的学生表示实验课前会认真查阅资料利用线上资源预习,另有10.81%的学生很少预习,表明大部分学生对本实验课程的学习态度是十分自觉、积极、主动的,只有极少部分的学生需要督促。

在混合式综合化学实验课堂上,引入手机和教学智慧软件进行实时互动,学生的接受和认可程度令人满意,有89.19%的学生认为手机实时互动对于监督学生课堂学习情况和提升课堂教学效果有帮助(图4),91.89%的学生反映通过混合式实验教学达到了预期的学习目标(图5)。该调查结果表明,

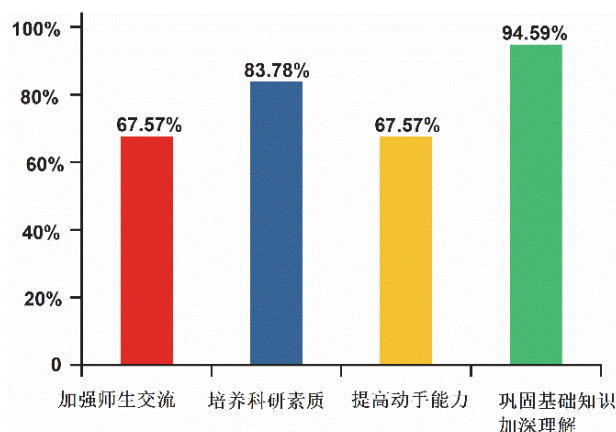


图2 关于综合化学实验课程的预期学习目标调查

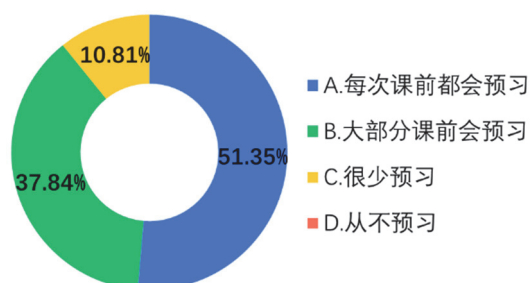


图3 关于实验前利用线上平台资源预习情况的调查

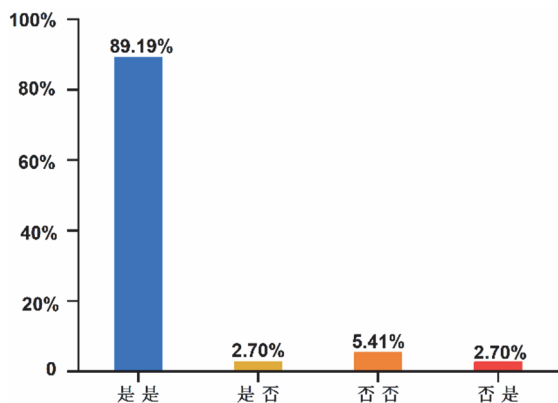


图4 关于应用手机实时互动对于监督学生课堂学习和提高课堂教学的效果是否有帮助的调查

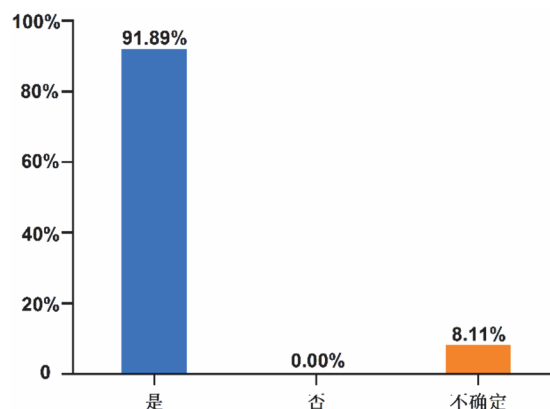


图5 关于混合式综合化学实验教学是否达到预期学习目标的调查

相对传统实验课堂，学生更倾向于引入混合式实验教学方式，并且手机实时互动的引入对于提升课堂教学和学生学习更有帮助。针对混合式实验教学方式的教学效果调查中(图6)，分别有72.97%和13.51%的学生认为利用教学智慧软件将线上教学与线下实验课堂相结合的混合式教学方式，对于掌握仪器结构、测试操作以及增加实验课堂的趣味性有较大帮助或必不可少；有70.27%和13.51%的学生认为该教学方式对学生掌握专业理论知识、提高分析和解决问题的能力有较大帮助或必不可少；75.68%和10.81%的学生认为混合式实验教学方式对于学生继续深造、从事科学研究具有较大帮助或必不可少。综合以上调查结果，有59.46%的学生认为线上、线下相结合的混合式实验教学相比于传统实验课堂更有优势、对学生的学习帮助更大；有32.43%的学生认为两者各有优势、都有帮助；只

有8.11%的学生认为传统实验课堂更占优势。关于混合式实验教学方式的进一步调查中(图7), 94.59%的学生认为课堂上师生双向交流情况很好、学习氛围活跃、学习兴趣浓厚。这说明, 大部分的学生对于线上、线下相结合的混合式实验教学还是十分认可的。

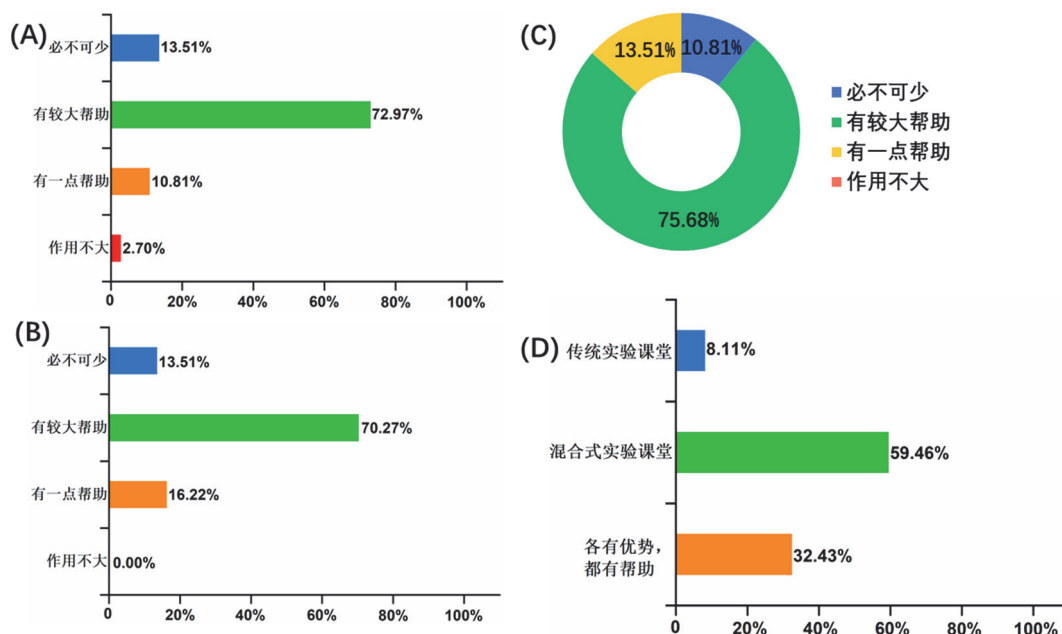


图6 关于混合式实验教学方式教学效果方面的调查

(A) 混合式实验教学方式对了解仪器结构、测试操作以及增加化学实验课堂趣味性的调查; (B) 混合式实验教学方式对于学生掌握专业理论知识、提高分析和解决问题能力的调查; (C) 混合式实验教学方式对于学生继续深造、从事科学研究的作用调查; (D) 针对混合式实验课堂和传统实验课堂优势的调查

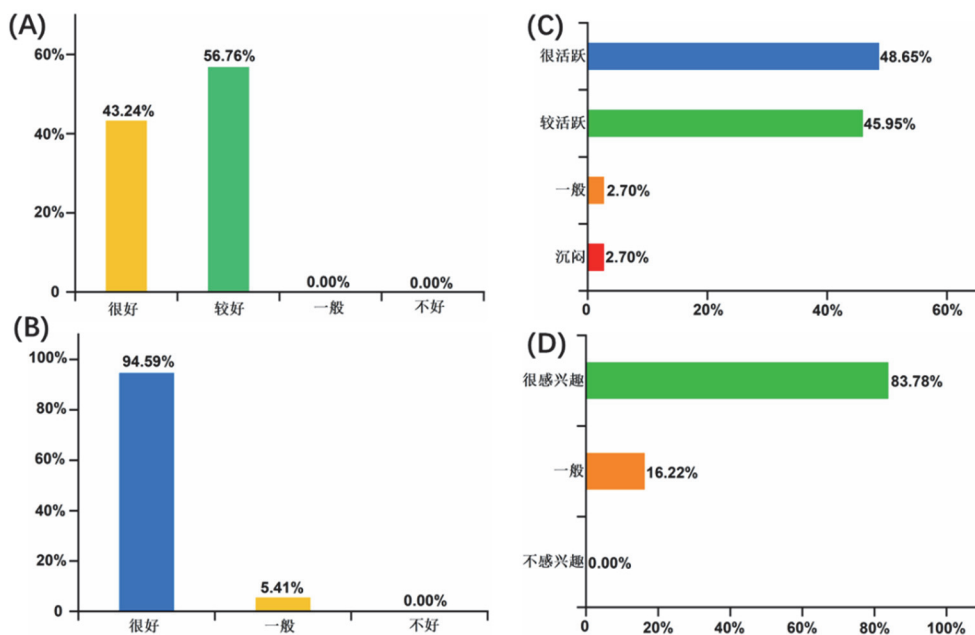


图7 关于混合式实验教学方式的调查

(A) 学生对混合式实验教学方式的看法; (B) 混合式实验课堂师生双向交流情况的调查; (C) 混合式实验课堂学习氛围的调查; (D) 混合式实验课堂上学生的学习兴趣调查

在成绩考核方面，我们依据平台数据较为客观地评价学生的课堂表现和学习效果。长江雨课堂智慧软件可以全面评价学生的课堂表现，如表1所示，长江雨课堂可以输出所有课堂数据，比如学生在课堂上的签到情况、答题情况和活跃程度等，从而学生的预习情况和课堂上的表现都可以得到量化，降低教师考核学生成绩时的主观性。

表1 部分学生课堂表现情况明细表

学生序号	签到方式	投稿次数	弹幕次数	累计得分	第1题	第2题	第3题
1	扫二维码	0	0	0	已投	B	粒子吸收光后发射光中的某一波长；粒子发射光中不同波长的光强度
2	扫二维码	1	0	4	已投	B	发射光；发射光
3	扫二维码	1	2	7	已投	未答题	入射；发射
4	扫二维码	0	0	0	已投	B	未答题
5	扫二维码	0	0	4	已投	未答题	不同激发波长下物质发射荧光的某一波长；物质所发射的荧光强度
6	扫二维码	1	2	5	已投	B	入射；发射
7	扫二维码	0	0	10	已投	B	激发；最佳激发
8	扫二维码	0	3	15	已投	B	激发；发射
9	扫二维码	0	0	10	已投	未答题	发射；发射
10	扫二维码	0	0	10	已投	B	未答题
11	扫二维码	0	2	5	已投	B	荧光；发射
12	扫二维码	0	0	13	已投	B	发射光；荧光
13	扫二维码	1	0	5	已投	B	入射；发射
14	扫二维码	0	0	0	已投	B	最大激发；最大发射
15	“正在上课”提示	1	1	17	已投	A	发射光；荧光
16	扫二维码	0	0	5	已投	B	发射；荧光发射
17	扫二维码	0	2	10	已投	B	发射光；激发光
18	扫二维码	0	0	10	已投	B	未答题
19	扫二维码	1	0	20	已投	未答题	荧光；发射
20	扫二维码	0	0	15	已投	B	发射；激发
21	课堂暗号	0	0	15	已投	B	发射；激发
22	课堂暗号	0	1	5	已投	B	入射激发光；发射光
23	扫二维码	0	0	15	已投	B	入射；发射
24	课堂暗号	1	1	15	已投	B	发射；激发
25	扫二维码	0	0	10	已投	A	入射光；发射光

4.2 对混合式综合化学实验教学的展望

关于教学，《礼记·学记》这样阐述：“是故学然后知不足，教然后知困。知不足然后能自反也，知困然后能自强也。故曰教学相长也。”教与学是一个相互影响、互相促进的过程，通过学生的课后

反馈,可以有针对性地对教学过程中的某些环节进行微调或改进,不断提高本课程的质量。本课程采用问卷调查的方式,掌握了学生对本课程的需求,结合学生的反馈意见,我们在将混合式教学方式引入综合化学实验教学的同时,要与时俱进,在保留本课程特色的基础上,确保教学内容紧跟学生培养要求和前沿科研动向,将新鲜的养料源源不断地输送给学生。

5 结语

基于培养化学学科拔尖人才、提升学生综合学术素养的教学要求,通过改革综合化学实验的教学模式,引入线上、线下相结合的混合式教学模式,以大型仪器为载体,以学生发展为核心,积极融入多种教学元素,增加不同专业知识的交叉融合,提升学生学习的积极性和参与度,最大限度地发挥学生的主观能动性。新的教学模式不仅可以深挖课程内涵、改变传统实验课程学生机械照搬操作的情况,而且有利于学生对所学专业知识的交叉融合,了解学术前沿动态,为拔尖人才培养提供有效的支持。

参 考 文 献

- [1] 朱玉军, 李川, 王香凤. 中国大学教学, **2019**, No. 4, 92.
- [2] 冯霞. 化学教育(中英文), **2019**, 40 (2), 83.
- [3] 欧阳小清. 大学化学, **2018**, 33 (2), 75.
- [4] 王伯康, 王志林, 孙尔康. 大学化学, **2001**, 16 (2), 25.
- [5] 张坤, 徐静, 陈长宝, 尹延斌, 于鸿达, 张瑞霞. 实验科学与技术, **2020**, 18 (6), 66.
- [6] 李俊波, 白慧云, 张鑫鑫, 杨燕强, 杨金香. 化学教育(中英文), **2019**, 40 (12), 44.
- [7] 朱平平, 冯红艳, 邵伟, 郑媛, 李玲玲, 李婉, 方思敏, 张万群, 李维维, 盛翔, 等. 大学化学, **2020**, 35 (5), 278.
- [8] 林兴桃, 赵靖强, 客慧明. 中国现代教育装备, **2019**, 9 (313), 8.
- [9] 蔡向忠, 王秀红, 李银生. 实验室研究与探索, **2014**, 33 (11), 168.
- [10] 李卉卉, 张士伟, 海锦慧, 杨小弟. 化学教育, **2015**, 36 (16), 40.
- [11] 林佳丽, 王建, 陈珠灵, 袁耀峰. 大学化学, **2021**, 36 (9), 2010045.
- [12] 於秋萍, 华洁, 李佳. 实验室科学, **2020**, 23 (6), 157.