

基于 PBL 的物理化学实验混合教学模式的设计与实践

温会玲, 唐林, 赵继宽, 李东祥, 温永红*, 高洪涛*

青岛科技大学化学与分子工程学院, 山东 青岛 266042

摘要: 依托自建物理化学实验在线开放课程及网络教学资源, 在物理化学实验课程中开展了线上线下混合式教学。“以问题为导向, 以学生为中心”设计课程教学, 开展探究式学习和过程性评价。通过课前线上预习、线下课堂教学和课后答疑指导等环节, 实现了学生能力的进阶式培养, 提高学生的自主学习能力、综合能力和创新能力。为高等学校实验类课程线上线下混合式教学模式的探索提供了范式。

关键词: PBL教学法; 以学生为中心; 实验教学; 混合式教学

中图分类号: G64; O6

Design and Practice of PBL-Based Mixed Teaching Mode in Physical Chemistry Laboratory

Huiling Wen, Lin Tang, Jikuan Zhao, Dongxiang Li, Yonghong Wen*, Hongtao Gao*

College of Chemistry and Molecular Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong Province, China.

Abstract: Based on the self-built online open course and internet teaching resources, the online and offline mixed teaching mode were carried out in physical chemistry laboratory. The “problem-based and student-centered” teaching processes were designed to carry out the inquiry learning and process evaluation. The students’ abilities were trained stage by stage before, during and after class to improve their autonomous learning ability, comprehensive ability and innovation ability. The results achieved provide valuable experience for the exploration of online and offline mixed experimental teaching mode.

Key Words: Problem-based learning method; Student-centered; Laboratory teaching; Mixed teaching

物理化学实验是化学类专业学生的一门学科基础课, 旨在使学生掌握物理化学的基本实验技能, 具有独立实验操作、实验研究和设计探索的能力, 养成严谨的科学素养, 具备正确的科学伦理观。目前物理化学实验教学中主要采用“教师讲、学生听”的“注入式”传统教学模式, 教学理念、方法陈旧, “教”与“学”信息不通, 学生“被动”接受知识, 自主学习意识较差等, 不能满足新时代对复合型、创新性人才培养的要求。

为了解决以上问题, 我们实施了以“问题为导向(Problem-Based Learning, PBL)”的教学法, “以学生为中心”进行教学设计, 采用课前线上自主学习与线下教学相结合的教学模式开展教学活动。课前教师设计问题、创设学习情境, “以问题为导向”采取小组合作学习的形式, 激发学生的学习兴趣。按照“异质分组”原则建立合作学习小组, “以优带差”促进课前及线上学习的有效参与度, 培

收稿: 2021-01-31; 录用: 2021-03-31; 网络发表: 2021-04-23

*通讯作者, Emails: yhw@qust.edu.cn (温永红); gaohao@126.com (高洪涛)

基金资助: 青岛科技大学一流课程建设项目(2020013); 山东省本科教学改革研究项目(Z2020029); 青岛科技大学教学改革研究项目(2020)

养学生的自主学习能力。同时,线上学习的学情分析,为线下教学设计提供依据,实现“教”与“学”的信息相通,使教学内容的设计更具针对性。

信息技术的发展为教学方式的改革提供了机遇,线上线下混合教学模式不仅应用于纯理论课的教学之中^[1-3],而且实验课教学中开展线上线下混合教学的研究工作也取得了丰硕成果。曾秀琼等^[4]以微视频为教学资源在基础化学实验中开展了线上线下混合式教学,刘云凤等^[5]报道了以培养自我调节学习能力为导向的分析化学实验混合教学模式,曾艳萍等^[6]报道了混合式教学在有机化学实验课堂教学中的应用。在物理化学实验课程中开展线上线下混合式教学的研究也有报道^[7-9],线上线下结合的混合式实验教学模式,弥补了传统实验教学的不足,但是目前仍然存在着以下问题:(1)线上教学资源匮乏,虽然短视频不少,但在授课过程中不一定合适,教师不得不采用语音视频等形式进行线上教学;(2)目前的线上资源缺乏针对性,中国大学MOOC等在线课程网站上的资源并不一定适合,而且不易本地化;(3)线上资源与线下实践不易同步,给使用师生带来了不便利。本文报道了依托自建SPOC精品在线开放课程,贯彻PBL教学法,进行物理化学实验线上线下混合式教学的设计与实践,希望能为高等学校实验课程线上线下混合式教学模式的探索提供一些帮助。

1 丰富多样的网络教学资源建设

2015年11月5日,国务院发布了《统筹推进世界一流大学和一流学科建设总体方案》,启动了“双一流”建设,推进学科、专业、课程的一体化,坚持科教融合、产教融合。而高质量的课程建设是实现“双一流”建设目标的基石^[10,11]。为了响应教育部一流课程建设号召,打造一流的课程教学体系,本教学团队取得了如下教学建设成果。

1.1 在线开放课程

2019年我校物理化学实验荣获山东省高校在线联盟精品课程,在“智慧树”和“学银在线”上线。在线课程的视频制作涵盖了全部教学实验,每个实验均制作了“理论篇”和“操作篇”的完整视频。“操作篇”展示了规范的操作过程,讲解了实验注意事项和容易出现的问题,尤其是平时教学中实验操作的关键点,都展示了“特写镜头”,为学生线上自主学习、课前预习和了解实验操作的全貌提供了便利。目前线上运行2期,“智慧树”累计选课人数1553人、选课学校6所、互动4116人次。“学习通”累计页面浏览1402320次、选课人数3217人次,选课学校7所、互动137人次。

1.2 物理化学实验在线考试系统

与北京欧倍尔软件技术开发有限公司合作,开发了物理化学实验在线考试系统。该系统能够高效灵活地实现机构管理、题库管理、试卷管理及成绩管理;具有高度的可扩展性,被授权的考试用户,不受考试地点限制,只要利用网络登录在线考试系统,就可以参加在线考试;可以按出题策略实现随机抽题组卷、在线评分、生成成绩单、给出成绩分布图及简单的试卷分析。目前该系统已经成功运行5个学期的考试工作,参与考试学生近6500人。

1.3 物理化学实验教学课件

制作了两套侧重点不同的物理化学实验教学课件PPT,于2018年底投入使用。一套为专供学生预习用的,注重知识的拓展和深化,上传至本校“基础化学实验中心”网站,供学生使用;一套为任课教师上课用的PPT,注重教学重点难点的突破。

上述成果为学生线上自主学习及线上线下混合式实验教学模式的探索与实践奠定了坚实的基础。

2 基于PBL教学法的混合式教学环节设计及多元化的考核制度

本着“以学生为中心、以问题为导向”的教学理念,依托SPOC在线开放课程,设计线上线下混合式教学过程,如图1所示。打破了传统教学“教师讲,学生听”的“注入式”教学模式,体现“以学生为中心”的教学理念。课前学生“以问题为导向”开展小组合作式和探究式学习;线下课堂提问、讨论、学生出题抢答、教师重难点讲解等多种教学方式融合使用,课堂气氛活跃;课后通过作

业和高阶议题讨论,使教学内容得到进一步深化和拓展。整个教学过程充分发挥了学生的主动性,教师为“教练”的角色,指导学生的学习技巧和学习结果的评价总结。提高了学生的自主学习能力、语言表达能力、综合能力和创新能力。同时借助信息化教学工具,把课堂延伸到了教室或实验室以外,使教学活动不再受时间、空间限制,学生根据自己的时间自由的学习,为碎片化时间的充分利用提供了机会^[12],零碎时间的积累可能会产生巨大的效果;也利用平台讨论区、微信、QQ等信息化工具,使学生与教师能够及时沟通,解决学生的疑问。

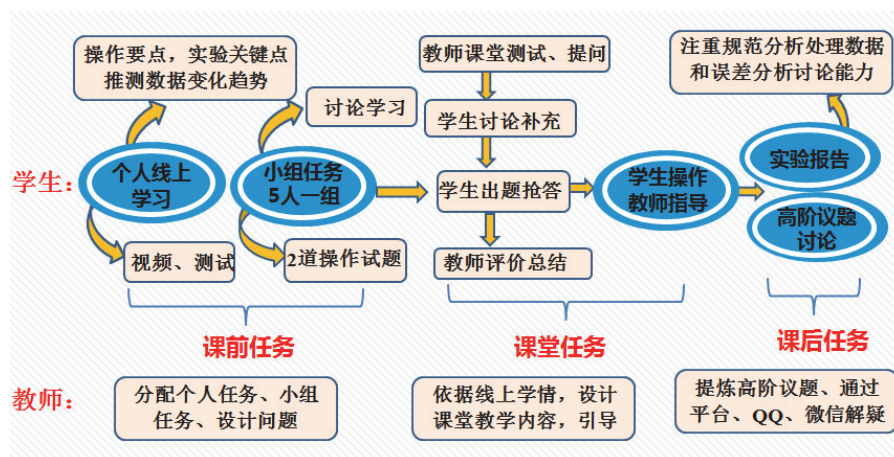


图1 基于PBL教学法的教学环节设计

2.1 实验教学环节

实验教学环节包括学生课前线上自主学习、线下课堂教学、课后作业及拓展三项。

(1) 课前线上学习。教师课前发布个人学习任务、小组任务、设计问题,学生在规定时间内,借助“智慧树”或“学习通”平台,完成实验“理论篇”和“实操篇”的视频学习、弹幕答题或章节测试。依据教师设计的问题以小组讨论探究的形式完成小组学习任务,每个小组出2道实验操作方面的考题,要求题目能反映实验关键点,问题明确清晰,在课堂抢答环节展示,培养学生的发散思维,鼓励学有余地的同学用PPT展示学习成果。部分简单的基础验证性实验采用翻转课堂教学,小组成员课前必须分工合作,收集资料,共同完成小组PPT制作和讲稿,进一步提高学生的综合能力。每个同学要总结出“实验操作要点,标注实验关键点,推测所测数据的变化趋势”用以指导下实验操作,以便实验过程中及时发现数据“异常”,加强学生理论联系实际,以理论知识指导实验操作的意识。小组讨论探究式学习,不仅强化了学生对重点知识的理解和实验关键点的学习,还锻炼了学生的自主学习能力、独立思考能力和团队合作能力。图2是教师的课前教学设计举例,分别是翻转课堂教学和讨论探究式教学的课前任务。“溶解焓测定”实验原理和操作过程简单,所用的仪器(贝克曼温度计和磁力加热搅拌器)通过查阅文献和线上“实操篇”的视频学习,学生能够学会使用方法,采用翻转课堂的形式教学。“完全互溶双液系统的相图绘制”实验内容较难,操作中的注意事项较多,采用课前教师“问题引导”、学生“小组讨论”,课中“讨论探究”的方式教学。

(2) 线下课堂教学。线下教学主要采用讨论探究式或翻转课堂教学。教师依据学生线上学习的学情分析,设计好课堂测试题及问题,用以检查和督促学生的线上学习。首先是课堂测试或线上学习总结(5 min左右),表1是课堂测试题。其次采用提问、学生讨论补充(10 min左右)、学生出题抢答(10 min左右)、教师评价和重点讲解(10 min左右)等讨论探究式或翻转课堂的方法完成实验原理核心内容及操作要点的学习,教师还可以依据学生情况,适当进行内容拓展及深化。翻转课堂教学中,每个组进行PPT展示和课堂讲解环节,教师要引导其他组成员质疑、提问、讨论。教师要做好评价总结,纠正问题,及时肯定学生的闪光点,激发学生的学习热情。最后学生完成实验(3–4 h,设计性实验10 h),教师在必要时引导。

溶解焓测定实验反转课堂学习任务：（全班分为四个小组）

个人课前学习任务：预习教材溶解焓测定实验，明确实验目的，理解实验原理，熟悉所用仪器及试剂，熟悉仪器使用方法，熟练掌握步骤及操作注意事项；完成学习通共享课的视频学习和作业测试；完成预习报告。

小组课前任务：

第一组任务：课前预习检查：出几个测试题，难度适中，可以是判断题、单选题、多选题等（还没上课，不能太难，组员一起推敲试题的表述，要规范准确）。

实验目的：

实验原理：盐类的溶解过程、影响溶解焓的因素、溶解焓的定义（包括积分溶解焓和微分溶解焓），积分溶解焓和微分溶解焓的区别。

第二组任务：溶解焓的测定方法，量热法测定溶解焓的基本原理。
$$\Delta_{\text{sol}}H_m = -[m_1C_1 + m_2C_2 + C]\frac{\Delta T M}{\dots}$$
，该公式的推导及公式中各字母的含义。热量的能当量及其单位。

第三组任务：作图外推法求真温度的原因及方法。

第四组任务：讲解实验步骤。注意操作细节、实验关键点的讲解、贝克曼温度计的使用方法及其与普通温度计的区别。

1. 以上小组任务，要求做好 ppt，讲解内容顺序小组集体商量，合理安排。熟练 ppt 内容，能流利的讲解相关内容。每组推荐一名讲的最好的同学，课上讲解。
2. 每个组出两个题，要求是实验操作方面的，上课时用于考察别的组的同学的预习情况，考题一定要做好保密工作。

完全互溶双液系统相图绘制：

本实验预习时搞清楚以下问题，每个组分合作收集资料，在组长的组织下进行小组讨论，理解问题的答案即可，不要求背会。同学们可以把学习成果做成 ppt，上课时展示分享给大家学习。一定注意，分享问题或者回答问题的每个同学，就相当于一个小老师，语速要慢点，声音大点，让全班同学听到，你们是代替老师，在给大家分享学习内容。每个组把本实验中不能自学理解的内容列出，上课时老师讲解。

1. 什么是完全互溶双液系？
2. 完全互溶双液系统，压力一定时的温度-组成相图有哪几种类型？
3. 实验过程中直接测定的是什么数据？
4. 绘制相图需要哪些数据？
5. 实验过程中，为什么要绘制标准工作曲线？
6. 看视频学会阿贝折射仪的使用方法。
7. 为什么用测定折光率的方法测定样品的组成？
8. 实验过程中应该注意什么事项？

每个组出两个实验操作方面的考题，上课时用于考察同学们的预习情况，考题一定要做好保密工作。（考题要小组一起斟酌，表述要准确，合理。也就是，别人一听，就明白你在问什么。）

图2 教师课前教学设计

表1 课堂测试题(以电池电动势的测定为例)

题型	检测内容
填空题	1. 本实验测定电池电动势的方法是() 2. 电极电势可以根据()方程计算
判断题	1. 测定电动势时，电池的正极与电位差计的正极相接，负极与电位差计的负极相接 2. 饱和甘汞电极的“饱和”指的是KCl溶液是饱和的
单选题	1. 电池的电动势可按()式计算。 (A) $E(\text{左})-E(\text{右})$ (B) $E(\text{右})-E(\text{左})$ 2. 电池中的正极也称为()。 (A) 阳极 (B) 阴极

实验操作过程中，教师严格要求学生规范记录实验数据，不抄袭、不编造，养成良好的科学伦理观。例如：原始数据记录要注明室温、大气压等实验条件，所用试剂和仪器要写清楚生产厂家、规格，数据记录用三线表格，标注单位。实验过程中对于学生不规范的操作，教师要及时指导纠正，使学生熟练掌握物理化学实验的基本技能和技巧。

引导学生树立正确的实验观，明白实验数据“异常”或“实验失败”很正常，“异常中可能存在新发现”。引导学生分析“异常”或“失败”的原因，通过“分析问题、解决问题”培养学生的综合实验能力。例如：电动势测定实验中，所测的电动势数据不对，引导学生分析可能的原因：仪器、电极、电极连接线、溶液等。如何解决问题呢？从电极、电极线、仪器、溶液，一项一项地排查，训练学生解决问题的思路和方法。培养学生的质疑精神、探索精神和追求真理的信念。

拓展教学内容，使知识融会贯通，举一反三，提高教学内容的“高阶性”和“挑战度”。例如：“黏度法测定高聚物的分子量”实验，是用乌氏粘度计进行测定的。可以让学生讨论如下议题：“奥氏粘度计和乌氏粘度计有什么区别？本实验可以用奥氏粘度计测定吗？要是可以请设计实验方案”。学生需要查资料了解两个黏度的测量原理，只要清楚了测量原理，后面的问题就迎刃而解。“液体饱和蒸气压的测定”是用静态法测定乙醇的蒸气压，设计的高阶议题是“请设计出用动态法测定乙醇饱和蒸气压的实验方案”。不仅锻炼了学生独立探究问题、解决问题的能力，还培养了学生设计

实验的能力和创新能力。

尤其是设计性实验,学生根据教师提供的研究课题和实验要求,四人一组,分工合作,查阅文献,共同设计实验方案,和教师反复讨论修改方案,独立完成实验,最后按照科研论文的格式完成论文的撰写。使学生体验了一次比较完整的科研过程,培养了学生的创新能力、科研素质和团队协作能力。

线下教学中,操作视频避免了教师讲解“一次过”的不足,一些平时讲解时的难点,例如“完全互溶双液系统相图的绘制”实验中的“回流高度”的确定(图3a)、阿贝折射仪的“明暗界面”状态(图3b)等内容,结合视频讲解,学生一目了然。视频图像与教师讲解的结合,弥补了单纯语言表达的不足和单纯视频缺乏互动的缺点,提高了学生的学习兴趣和学习效率^[13]。学生也说,“操作步骤视频很吸引人”“喜欢看操作步骤视频”“可以随时看”。线上操作视频的学习也使学生的实验操作更加得心应手,节省了线下讲解和实验操作时间。最明显的感觉是,刚开始实验时,不知如何下手的状态没有了;一些以前需要反复叮嘱的细节,学生基本上可以自己解决了。线上学习与线下教学融合,实现优势互补,取得了非常好的教学效果。

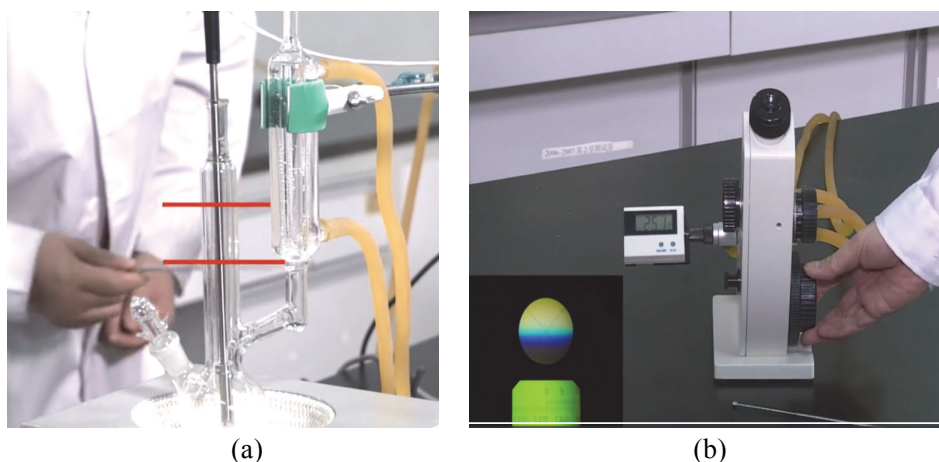


图3 (a) “回流高度”教学视频截图; (b) 阿贝折射仪“明暗界面”调节视频截图

(3) 课后作业及拓展。学生按教师要求完成实验报告,要求内容简洁明了,能自己总结实验原理和操作步骤,规范地归纳、分析、处理实验数据,表达实验结果,合理地进行误差分析及讨论,能提出有新意的观点。鼓励学生参与“平台”讨论区高阶议题的讨论,使教学内容进一步得到拓展和深化,增加挑战度,强化学生的综合能力、创新思维及创新能力,为拔尖人才的培养打好基础。

2.2 多元化的考试方式及成绩评定细则

制定了多元化的教学考核制度,对学生进行全方位的考核,注重学习过程的考核,提高了学生的学习参与度,培养了学生的自主学习能力。学生的总成绩中过程性评价占70%,终结性评价占30%^[12],还增加了非标准化评价,如额外加分项目——课堂抢答及高阶议题的讨论参与,激励学生的学习积极性,培养学生的创新思维(图4)。平时成绩中的基础实验成绩由课前线上学习(15%)、实验操作(40%)、安全卫生(5%)、实验报告(40%)四部分组成,设计实验成绩由方案设计(20%)、实验过程(50%)、论文撰写(30%)三部分组成。其中,线上学习成绩又由视频学习(50%)、章节测试(30%)和学习次数(20%)构成(图5)。

3 教学效果分析

3.1 提高了学生的学习积极性和参与度,教学效果明显提高

表2是化学181班学生线上学习参与度统计表。线上学习内容:视频44个、章节测试题14套、

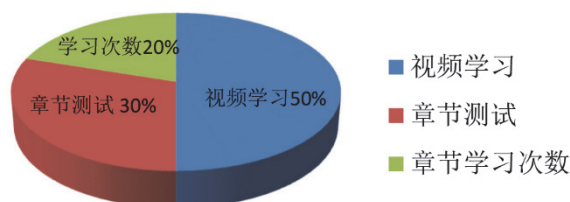
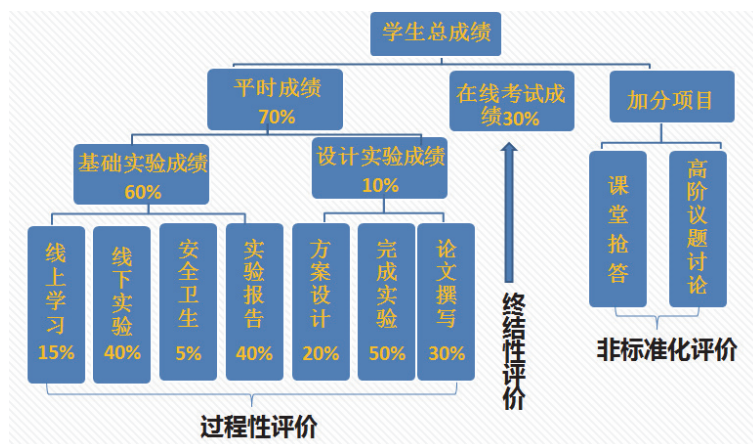


表2 化学181班学生物理化学实验线上自主学习情况统计表

项目名称	项目总数	最少学习人数	最多学习人数	教师批阅
视频	44	27	28	100%
章节测试	14	27	28	100%
作业	25	26	28	100%
高阶议题	3	8	15	

作业25份和课后高阶议题3个。例如，44个视频学习任务，全班28个同学几乎都完成了该项学习任务，有的同学甚至看了好几遍，视频完成率达到300%多。章节测试和作业任务的完成情况类似。该班同学在学习通的学习次数高达5868人次。高阶议题是我们在多年的教学过程中提炼的能力提高题，是选做加分项，主要是为了拓展和深化学习内容，为学有余力的学生提供高阶学习机会，达到分层教学目的，锻炼学生的综合思维能力及创新思维能力。大部分同学能够积极参与讨论，在全班28个学生中，有的议题参与讨论的学生达15人，最少的也有8人参与讨论。由此可见，学生线上学习的参与度和学习积极性挺高。

“以问题为导向，以学生为中心”的教学设计，充分调动了学生的学习参与度。学生在组长的组织下能够按要求完成课前学习任务，课堂上积极参与互动，发表自己的观点。翻转课堂教学中学生能熟练完成课堂讲解，内容较充实，PPT制作认真、美观。有的组课堂讲解大家参与，每人讲一个问题，图6是翻转课堂教学图片。课堂抢答环节学生出的题目，大部分能反映实验操作关键点，学生也能主动回答、补充，课堂气氛轻松活跃。教学方式得到学生的肯定，取得了较好的教学效果。如学生所说：“小组讨论形式非常新奇，组织同学小组分工合作，提高了学习积极性，也提高了小组成员之间的合作力。”图7是“智慧树”平台学生对本课程的综合评价，251人学生参与评价，87.75%的学生给了满分。



图6 翻转课堂教学学生的PPT展示及讲解

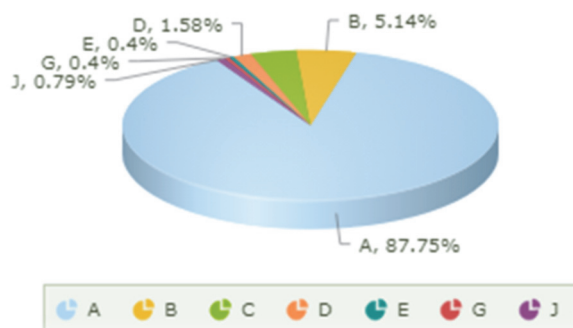


图7 “智慧树”教学评价

基于PBL的混合式教学设计充分调动了学生的学习热情，学生线上学习和高阶议题的参与度、课堂活跃度、实验钻研精神都明显提高，取得了较好的教学效果。表3为相同专业平行班混合式教学与传统教学学生成绩分布统计表，混合式教学班级学生的及格率、平均分、高分段的学生比例明显增加，平均分高于传统教学班级将近6分，尤其是实验报告的“误差分析及讨论”中能更加全面、合理地分析各种影响因素，而不再是为了应付教师要求，随便写一两句。

表3 同专业平行班混合式教学与传统教学成绩分布统计表

教学方式	班级	各分数段人数占比					平均分
		0-59	60-69	70-79	80-89	90-100	
传统教学	金属191	3.7%	33.33%	48.15%	11.11%	3.7%	72.98
	包装192	14.29%	47.62%	14.29%	23.81%	50%	68.01
混合式教学	金属192	0	9.09%	50%	36.36%	4.55%	78.86
	包装191	0	26.32%	47.37%	26.32%	0%	75.33

3.2 注重学生能力的进阶式提高，为拔尖人才的培养打好基础

课前以教师设计的问题为导向，通过在线学习掌握基本概念、基本原理、实验基本操作步骤，以小组讨论的形式加强对实验核心内容和操作要点的学习，培养学生的自主学习能力和团队协作能力。线下课堂通过提问、学生讨论、学生出题抢答、学生实验操作等环节，学生的语言表达能力、实验基本能力、综合能力和学习参与意识明显提高。学习后期学生能够积极主动地回答问题，表达准确有条理，对待教师的提问积极思考，相互讨论，呈现跃跃欲试、自信满满的状态，不再是“全

班低头”“战战兢兢”的样子，课堂气氛更加活跃。实验过程中能够胸有成竹地进行操作，提出有新意的问题，准确合理地表达自己的观点；实验报告的“误差分析及讨论”部分，分析更加准确合理，讨论有新意。如图8所示，通过课前“概念学习、操作要点总结”，课堂“质疑、讨论和操作”，课后“误差分析及讨论”及“高阶议题”的讨论，引导学生由基本能力训练向综合能力、创新能力的进阶式发展，为培养拔尖人才打好基础。

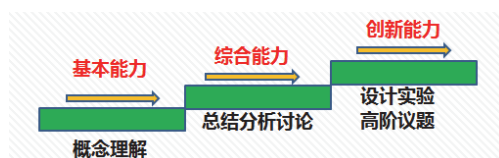


图8 学生能力提升路径

教学过程中也发现了一些问题，如：由于线上学习教师对学生的约束有限，个别学生的成绩下滑；小组学习中存在“打酱油”的现象等。这些情况为后期教学模式和教学方法持续改进提出了新要求。根据建构主义理论^[14]，学生的参与度越高，兴趣越浓，学习的主动性、耐力和效果越好^[15]。在今后的教学中，在依据学生的认知规律构建学习情境、设计吸引学生的教学方式、激发学生的学习参与度方面多做研究，培养学生的终身学习意识和独立实验能力^[16]，让学生成为学习的主体，充分体现“以学生为中心”的教学理念。

4 结语

贯彻PBL教学法，“以学生为中心”设计实验教学过程，将线上教学与线下实验室教学相结合，实现优势互补，有效地提高了学生的学习效果，提升了学生的自主学习能力和综合素质和创新能力，是实验教学方式探究的一条必要途径^[17]，为开展线上线下混合式实验教学积累了经验。

参 考 文 献

- [1] 张晓蕾, 贾春晓, 李洪亮. 大学化学, 2020, 35 (5), 133.
- [2] 盛赛莹, 张文清, 王燕, 赵怡, 刘海燕, 钱俊红, 张波, 王氢, 胡坪. 大学化学, 2021, 36 (1), 2002027.
- [3] 王旭珍, 王新平, 王新葵, 宋雪旦, 田东旭, 陈冰冰, 石川, 纪敏. 大学化学, 2018, 33 (11), 6.
- [4] 曾秀琼, 蔡吉清, 顾昊睿, 王敏, 徐孝菲. 大学化学, 2020, 35 (9), 26.
- [5] 刘云凤, 阎小青, 乔增杰. 大学化学, 2021, 36 (1), 2006046.
- [6] 曾艳萍, 李明, 林洪, 黄齐林. 大学化学, 2020, 35 (9), 47.
- [7] 贾雪平, 葛明, 张跃华, 缪建文, 葛存旺. 大学化学, 2021, 36 (1), 2011050.
- [8] 王迎, 张为超. 教育教学论坛, 2021, No. 1, 110.
- [9] 崔孝玲, 李红霞, 赵冬妮, 苟国俊, 王冰. 当代化工研究, 2020, No. 21, 119.
- [10] 胡涛, 鲍浩波, 孟长功, 赵琨, 于永鲜, 王慧龙, 陶胜洋, 刘淑芹. 大学化学, 2018, 33 (11), 1.
- [11] 周光礼. 教育研究, 2016, No. 5, 436.
- [12] 龙旭, 唐志书, 唐于平, 史亚军, 靳如意, 郭惠, 孟庆华, 李佳佳, 张拴, 李小蓉. 化学教育(中英文), 2020, 41 (20), 86.
- [13] 胡敏, 高培红, 向丹, 巴召静. 大学化学, 2016, 31 (10), 57.
- [14] 朱芋里. 亚太教育, 2015, No. 4, 287.
- [15] 郑超. 大学化学, 2020, 35 (3), 21.
- [16] 张树永, 朱亚先, 张剑荣. 大学化学, 2018, 33 (10), 1.
- [17] 孙隽, 杨延梅. 实验技术与管理, 2016, 33 (7), 200.