

•教学研究与管理•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202210084

www.dxhx.pku.edu.cn

思维能力导向的线上物理化学实验课程建设与应用

闫华*, 吴俊勇, 吴树昌, 陈浩, 陈章新, 钟爱国, 金燕仙

台州学院医药化工学院, 浙江 台州 318000

摘要: 为了解决物理化学实验课程学习难度大与课堂教学时间少的矛盾, 弥补传统的物理化学实验教学“重过程、轻结果”的缺点, 建设了线上物理化学实验课程。线上物理化学实验课程通过实验原理和仪器操作视频、实验习题、问题讨论等模块, 完成知识、技能和思维能力的培养, 与线下实验操作训练形成良好的互补关系。线上物理化学实验课程为翻转传统的物理化学实验课堂提供了前提条件, 明显提高了教学效果。

关键词: 物理化学实验; 线上; 翻转课堂; 一流课程

中图分类号: G64; O6

Development and Application of an Online Thinking-Ability-Oriented Course of Physical Chemistry Experiment

Hua Yan*, Junyong Wu, Shuchang Wu, Hao Chen, Zhangxin Chen, Aiguo Zhong, Yanxian Jin

School of Pharmaceutical and Chemical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang Province, China.

Abstract: An online course of physical chemistry experiment was developed. The primary goal of the course is to bridge the gap between the challenges posed by physical chemistry experiment and limited classroom teaching time. Moreover, we anticipate that the course will compensate for the shortcomings of traditional physical chemistry experiment teaching, which emphasizes the process and ignores the results. This online course should cultivate student knowledge, skills, and thinking ability through modules, such as experimental principles, instrument operation simulation, experimental exercises, and problem solving. Furthermore, the course can serve as a remarkable complementary approach to offline experimental operation training. The online course of physical chemistry experiment provides a prerequisite for flipping the traditional classroom of physical chemistry experiment and significantly improves teaching effects.

Key Words: Physical chemistry experiment; Online; Flipped classroom; First-class courses

物理化学实验属于实践类课程, 但它的理论性相对较强, 实验原理在整个课程体系中占据核心和基础地位, 实验仪器的选择、实验条件的控制、数据处理与分析等环节都建立在实验原理的基础上。在多年的教学实践中, 我们发现学生在实验操作中出错、不会实验数据处理、思考题回答不正确都根源于实验原理不清, 或者理论指导实践的能力不足。在传统的课堂教学中, 教师往往按部就班地讲授实验原理、仪器操作、实验步骤、注意事项等。教师的讲授时间在整个课堂教学中占用相当多的时间, 然而学生的注意力难以长时间集中, 收到的教学效果不佳。物理化学实验教学长期存在“重过程、轻结果”的现象。为此, 我们将物理化学实验原理和仪器使用操作录制成视频供学生

收稿: 2022-10-27; 录用: 2023-01-16; 网络发表: 2023-02-08

*通讯作者, Email: hyan@tzc.edu.cn

基金资助: 教育部产学合作协同育人项目(201901116018); 浙江省一流课程(浙教办函〔2021〕195号)

观看, 分解课堂教学的压力, 教学效果得到了明显提高, 也建成了浙江省高校首门化学类实验线上一流课程^[1], 课程也被推荐到国家高等教育智慧教育平台^[2]。

本课程的建设获得了包括教育部高等教育司、浙江省教育厅、台州学院教务处、超星集团有限公司(超星公司)和杭州简学科技有限公司(简学公司)等有关部门和单位的政策、资金和(或)技术支持。2018年, 我们利用电脑录屏或手机录像的方式将实验原理、仪器操作拍摄成微视频, 并利用超星公司网络平台建设课程网站供学生观看学习, 教学效果有了明显提高。2019年, 本课程被批准列入“第三批省级精品在线开放课程建设名单”, 开始在浙江省高等学校在线开放课程共享平台进行课程建设与运行。同年, 与简学公司合作, “物理化学实验在线导学课程建设”获批教育部产学研合作育人项目。在该项目经费的支持下, 我们重新拍摄制作了实验原理、仪器操作等相关的微视频, 并对网站内容进一步充实和完善。2021年, 物理化学实验(原理与技术)课程通过浙江省线上一流课程认证。2022年, 本课程被推荐到国家高等教育智慧教育平台。本文主要介绍本课程的设计与内容、教学过程的实施、课程考核的改革、教学效果与体会, 希望能够起到抛砖引玉的作用, 助推实验类课程建设。

1 课程的设计与内容

1.1 求实效、不求全

传统的实验类网络课程视频内容, 往往把线下实验课堂中教师讲授的内容全部搬到网络上, 内容非常全面, 包括实验目的、实验原理、实验步骤、仪器操作和注意事项等。在学习过程中, 学生往往抓不住重点, 吃不透难点, 学习效果不太理想。与理论性课程比较, 实验类课程不可能完全在网上完成教学, 实验操作训练必须在线下完成。实验类网络课程教学应当发挥网络教学的优势, 承担线下实验课堂教学难以完成的内容任务, 弥补线下课堂教学的不足, 与线下实验操作训练形成互补的关系, 以全面提高实验课程教学效果。

物理化学实验教学的难点主要在于实验原理。实验原理难在理论性和逻辑性较强, 学生往往需要一定的时间进行消化吸收。传统的线下课堂讲授一遍的内容, 学生可能来不及消化吸收, 甚至很快忘记, 教学效果往往欠佳。网络视频教学不受时空限制, 可供学生多次反复观看。显然, 实验原理由线下改为网络视频教学, 能够解决线下一遍讲授的不足, 发挥网络教学跨越时空的优势, 提高教学效果。仪器操作是物理化学实验的重要组成部分, 每个实验都会用到相应的仪器来检测某个物理化学参数, 因此, 学生必须掌握相应的仪器操作。传统的线下课堂教学中, 教师一般一次面向十几到二十几个学生讲授和演示仪器操作。受到实验演示台周边狭小空间的限制, 大部分学生距离教师较远, 难以全面地看清楚仪器操作。而且, 有些仪器操作比较复杂, 看完一次很难保证全部记住操作步骤。若把仪器操作录制成视频, 能使每个学生看清每个操作步骤, 并且可以反复观看, 熟记于心。此外, 由于受时空的限制, 传统的线下实验教学中的实验习题训练、测验、讨论和考试, 组织起来相当麻烦。除了必要的考试环节, 传统的实验教学往往不进行习题训练、测验和讨论, 结果造成学生所学的内容得不到巩固、拓展和深化, 分析问题和解决问题的能力得不到充分锻炼。课程内容难度较大以及线下课堂教学的时空限制, 使传统的物理化学实验课程往往只能关注所做的具体实验能否完成, 数据和结果好坏似乎不会影响课程成绩的合格评定, 也忽视了更重要的知识和能力的拓展性训练, 即存在“重过程、轻结果”现象。网络平台在实验习题训练、测验、讨论和考试环节具有传统线下教学无可比拟的优势, 它除了突破时空限制外, 更能够实现批改作业自动化, 减轻教师繁重的批改作业任务。基于以上考虑, 我们制作了实验原理、仪器操作微视频满足线上教学需要, 并围绕实验原理和操作技能的核心内容构建了习题、测验、讨论和考试模块(图1)以供强化和拓展性训练, 弱化实验目的、实验步骤等视频教学。内容不求细而全, 只求实际教学效果, 以免学生抓不住难点和重点, 形成线上知识和思维能力培养与线下操作技能训练互补。

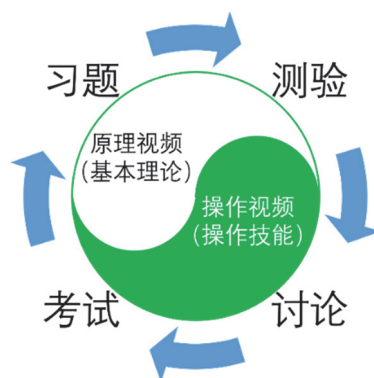


图1 线上课程主要内容

1.2 注重思维能力的培养

物理化学实验是对物理化学基本理论与公式的巩固、加深和运用，是对学生的演绎推理思维能力进行训练的重要课程。从逻辑关系上讲，实验原理在整个课程体系中占据核心和基础地位。如何运用实验原理解决实验过程的实际问题是教学的重点和难点。通过实验原理学习，需要达到如下几个目标点：清楚实验直接测定什么物理量、用什么仪器测、可靠的实验数据如何测得、最终求解什么物理化学参数。如果让学生完全自己预习，他们不会想到这些问题，就不明确预习的目标，对实验原理往往只停留在字面的认知，不能真正将理论用于指导实践，在后续的实验操作和数据处理过程中依旧迷茫，这就需要教师加以有效地引导。因此，围绕上述几个预习目标点，在实验原理视频的末尾，我们设计了几个问题引发学生思考，以引导学生建立实验原理与实践之间的关联，具体设计的问题举例详见表1。通过这样问题引导式的预习后，学生对实验原理理解的更加清楚透彻，进入实验室后能顺利地自主完成相应的实验操作以及后续的数据处理。学生在实验操作和数据处理中错误明显减少。如此，经过不同实验项目的反复引导和训练，学生就会明白实验原理的重要地位，强化学生用理论指导实践的意识，逐步培养学生演绎推理的逻辑思维能力，进而提高学生独立分析问题和解决问题的水平。

表1 设计问题举例

实验项目	设计的问题
纯物质液体饱和蒸气压的测定	1. 该实验直接测量的物理量是什么？如何计算摩尔蒸发焓？ 2. 测定 T 、 p 时是否需要达到相平衡？如何判断是否达到相平衡？ 3. 如果装置漏气，是否影响测定结果的准确性？
蔗糖转化反应速率常数的测定	1. 本实验直接测量的物理量是什么？用什么仪器测定？ 2. 酸在这里起到什么作用？其浓度需要控制吗？ 3. 如何求得该反应的速率系数 k ？
原电池电动势的测定及其应用	1. 本实验直接测定的物理量是什么？用什么仪器测电动势？ 2. 如何测定一个电极的标准电极电势？ 3. 如何用电化学的方法测定化学反应的热力学参数？

1.3 习题强化和拓展性训练

在每个实验项目中，我们针对原理、仪器选择、仪器操作、实验条件选择、过程的控制等选编或设计了若干道实验习题，供学生练习以完成实验理论和技能的巩固、强化和拓展性训练。例如，“纯物质饱和蒸气压的测定”实验项目涉及的物理化学原理是饱和蒸气压与沸点的关系。该原理与化学实验密切相关，几乎每天都被使用，是实验室内很多仪器或实验过程的原理，如：旋转蒸发(仪)、

真空干燥(箱)、冷冻干燥(机)、水热反应(釜)、恒温水浴和恒温油浴等。学生操作这些仪器时,未必会思考这些仪器的原理是什么、什么情况下需要用这些仪器,以及仪器使用有什么要求等问题。例如,某文献合成一种纳米材料以水作为反应介质,反应温度在150 °C,但没有写明用什么反应装置。显然,该反应不能在常压下进行,可选用水热反应釜。但是,有同学在常压下用普通的圆底烧瓶为反应器,在150 °C油浴中加热,这自然是错误的。常压下水的沸点是100 °C,水温不可能达到150 °C,这个常识学生肯定知道。学生学过物理化学后,肯定也知道压力增大水的沸点升高的规律。但是,学生并没有应用这些规律解决实际问题的意识和习惯。为此,我们需要设计相关的实验习题(表2)对学生进行拓展性训练,以达到举一反三、触类旁通的目的。

表2 “纯物质饱和蒸气压的测定”实验习题举例

序号	题目
1	饱和蒸气压的测定实验不需要的仪器是 (A) 温度计; (B) 压力差计; (C) 压力计; (D) 温差计
2	通过纯液体饱和蒸气压的测定,可以得到的是 (A) 沸点; (B) 饱和蒸气压; (C) 摩尔蒸发焓; (D) 以上都可以
3	日常生活所用高压锅内,水沸腾时的温度为 (A) 100 °C; (B) 大于100 °C; (C) 小于100 °C; (D) 无法判断
4	水热反应釜是一种恒容的密闭反应装置,其反应温度一般 (A) 低于100 °C; (B) 可高于100 °C; (C) 应在0–100 °C; (D) 应在25–100 °C
5	真空装置是实验室常用的仪器设备,下面仪器不需要真空条件的是 (A) 真空干燥箱; (B) 冷冻干燥仪; (C) 旋转蒸发仪; (D) 普通烘箱
6	某一纳米材料在180 °C水介质条件下反应,请估算反应体系的压力为多少?
7	水热反应釜最大工作压力不超过3 MPa,试通过计算说明反应温度不能超过多少?
8	将葡萄糖在180 °C水介质条件下碳化可以制备碳材料,该反应选用什么反应器比较合适?

1.4 融合特色创新性实验项目

依托创新性实验项目,对学生进行创新思维和能力的浸润和培养。基于科研反哺教学思想,本课程组教师利用自己的研究专长,指导学生开展课外科研实验,获得一些省级以上大学生科技创新项目,并有相关成果在专业学术期刊上发表。本课程网站将这些成果以特色创新性实验项目形式展现给更多的学生,供他们欣赏阅读以培养学生的创新思维和能力(表3)。

表3 特色创新性实验

序号	项目名称
1	滩涂海泥的矿物组成及其对亚甲基蓝的吸附
2	不同络合剂对Pd/MWCNTs催化剂的甲酸电催化氧化性能影响
3	利用有机化凹凸棒石颗粒制备W/O型Pickering乳液
4	取代乙烷交叉式与重叠式稳定性的密度泛函理论研究
5	用自然原子轨道电荷估测取代吡啶的pK _a 值

特色创新性实验项目的开发,不仅要体现特色性和创新性,还要基于物理化学实验教学内容的实际需要。固体表面吸附是物理化学实验课程的一个综合性实验项目,国内大多数实验教材选用活性炭作为吸附剂,考察其对有机染料的吸附行为、吸附热力学和吸附动力学。台州市属于浙江沿海城市,滩涂海泥资源丰富,然而开发利用十分有限。已有研究发现海泥对重金属离子和有机物有良

好的吸附行为。于是,我们指导学生申报了题为“滩涂海泥对染料废水的脱色性能和机理”浙江省大学生科技创新项目,并通过评审立项。在该项目研究成果的基础上,我们设计了题为“滩涂海泥的矿物组成及其对亚甲基蓝的吸附”特色创新性实验项目。该实验项目具有浙江沿海地方特色性和海泥开发利用的创新性,综合了X射线粉末衍射固体材料晶型分析和固体表面吸附理论知识,利用了扫描电子显微镜、X射线衍射仪、紫外-可见分光光度计、恒温摇床、烘箱等主要仪器,涉及到样品的采集、干燥、研磨、称量、溶液配制和移取、过滤、分析检测等操作过程。通过该实验项目的教学,可以对学生进行物理化学实验知识和能力的综合训练,同时能够对学生进行创新思维的浸润,也融入了对学生进行环境保护的思政教育。

2 教学过程的实施——翻转课堂教学

翻转课堂教学是把传统的教师课堂讲授、学生课后解决问题的教学模式颠倒过来,变为学生课前自学(预习),教师在课堂上引导学生解决问题的教学模式,它是以学生为中心的教学活动^[3-5],在物理化学实验教学中也已受到重视^[6-8]。显然,有效的预习是实现翻转课堂教学的重要环节,对学生进行必要的预习引导是实现有效课前学习的前提保证。与传统的文本教材比较,本线上课程中实验原理视频和仪器操作视频更有利于学生自主性学习,极大提高了预习效果。而且,实验原理视频导学式的授课方式,有利于培养学生的思维模式,让学生学会分析和抓住实验成功的关键因素。通过线上课程的学习,学生进入实验室即可独立进行实验操作。当然,这不意味着教师可以置身事外、不予过问。在学生动手实验前,教师需针对实验的关键点、容易出错的环节,以及实验安全问题再次提醒学生,确保实验顺利和安全地开展。我们把关键点、容易出错的环节、实验安全设计成问题让学生回答,以检查和督促学生课前预习工作。本课程整个教学过程(包括预习、实验操作、实验报告撰写等)均是在教师引导下、学生自主完成(图2),真正实现了课堂教学从教师为中心向学生为中心的转变,即实现了翻转课堂。

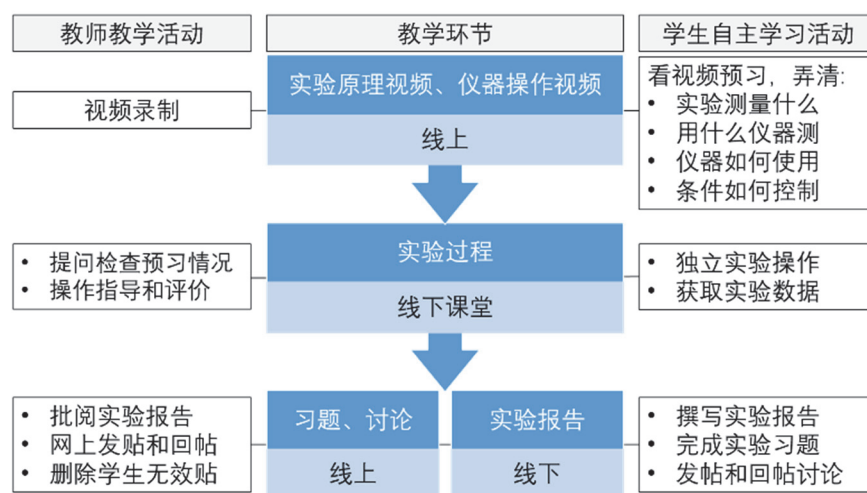


图2 教与学过程

与传统课堂教学模式比较,翻转课堂教学模式具有明显的优势。我们以“燃烧热的测定”实验为例,对两种教学模式进行比较。“燃烧热的测定”实验的原理和操作相对于其他实验较为复杂,实验过程也比较漫长,总学时一般为6学时。在传统的实验教学中,教师在课堂上往往需要花40-50分钟的时间讲授该实验原理和实验操作。这不仅占去了大量的课堂时间,而且教学效果往往不尽人意。这是因为,长时间讲授会使学生疲惫,更难让学生集中注意力听讲,即使学生注意听了,由于信息量太大也很难记住。结果导致,实验过程出现各种各样的问题,个别组学生在6个学时内不能完

成实验,教学效果自然不好。另一方面,如果教师不花些时间详细讲解实验原理和演示仪器操作,难以保证实验过程顺利进行以及实验数据处理和结果的正确性。由此可见,“燃烧热的测定”是令教师感到难教的一个实验。有了线上课程后,学生在进入实验室前可以分段观看实验原理视频(约18分钟)和氧弹量热计使用操作视频(约22分钟),避免长时间听讲造成疲惫,学习起来相对比较轻松,而且还可以反复观看,直至弄清实验原理和熟悉仪器操作。进入实验室后(线下课堂教学),教师以提问的方式让学生回忆实验的关键环节和注意事项,借此也可以检查学生的预习情况,然后告诉学生仪器和药品所在位置,即可让学生动手开始实验。在实验的过程中,教师观察每组学生的实验动态,在关键时候及时辅导个别有困难的同学顺利完成实验即可。图3较为详细地展示了“燃烧热的测定”实验的教学过程。经过如此的翻转课堂,传统教学中的难题被破解,该实验线下课堂教学均能在4个学时内顺利完成,大大节省了课堂教学时间,实验结果也比之前有很大的改善。

教学过程	问题设计	目标达成
线上预习 - 学生观看“燃烧热的测定”实验原理微视频、氧弹式量热计使用操作视频; - 完成相关的习题(选择题),网络系统自动批改	- 直接测量的物理量有哪些?最难测是哪一个?如何正确校正温度? - 最终求解什么物理化学参数?如何求解? - 若燃烧不充分,会不会影响测定结果,结果如何?为保证燃烧充分应该采取什么措施? (放在实验原理微视频的末尾)	- 明确测量什么物理量,每个物理量如何测; - 会用雷诺较正法对温差进行校正; - 会通过测量的物理量计算燃烧热; - 清楚燃烧充分与否对测定结果的重要影响,并明确保证燃烧充分的措施
线下实验 - 教师针对实验的关键点设计问题,让学生回答 - 学生实验操作,采集实验数据 - 教师巡视实验过程,给予必要的提示	- 雷诺较正曲线中,燃烧前和燃烧后两段曲线的意义是什么?若这两线段太短对作延长线有什么影响? - 内桶温度应调至比夹套水温低多少度?过高或过低有何不妥? - 如何保证点火成功? - 保证燃烧充分应注意哪些事项? (学生动手实验操作前)	- 会用氧弹式量热计 - 确保学生能够得到较好的、可靠的升温曲线 - 确保学生能够一次点火成功 - 通过提问和巡查,进一步检查预习效果
撰写实验报告,并完成网上习题 - 学生撰写实验报告,并完成网上习题和讨论 - 教师批改实验报告和习题,并把结果反馈给学生	举例: (基础题) 燃烧热测定实验中,公式 $Q_p = Q_c + \Delta n_g RT$ 中的 T 是指 (A) 夹套水温 (B) 内桶水温 (C) 室温 (D) 氧弹温度 (提高题) 氧弹式量热计也可测定液体样品的燃烧热,这与测定固体样品的的方法有什么异同?请简述你的测定方案。	- 实验原理清楚、数据处理正确、结果分析合理 - 燃烧热的测定相关的习题会做,实现对知识巩固和解决问题能力的拓展性训练

图3 “燃烧热的测定”教学案例

3 课程考核的改革

预习是实验课程学习的重要环节,在翻转课堂教学模式中尤其重要。良好的课前预习,能够保证实验操作顺利开展,确保采集到可靠的实验数据,并可避免实验过程中危险事件的发生。传统的实验课程一般都要求学生做好课前预习,并撰写实验预习报告,教师根据实验预习报告评定预习成绩。物理化学实验原理本身较难理解,教师也难于对学生预习过程进行有效的监督和指导。部分学生不加思索地照抄教材内容,往往只要预习报告写得工整漂亮,预习成绩也能得高分,这难以反映学生是否真正理解实验原理和明确实验过程。显然,非常有必要对传统的实验预习评价进行改革。

本线上课程通过微视频(实验原理和仪器操作)和习题引导学生进行实验预习,线上预习评价包括:视频观看(20%)、作业(20%)、测验(20%)、考试(30%)、发帖讨论(10%)等部分。其中,作业、测

验和考试均建立在习题的基础上,作业是平时学习过程的训练,同一作业有3次提交机会,测验和考试分别是阶段性和期末对学习成果的检验,只有1次提交机会。此评价过程避免了教师的主观影响,评价也更加全面。当然,纯线上预习评价负面的结果是,可能会有个别同学为了应付,无效刷视频、让人代刷题和无效刷贴的现象。经过几年的实践,我们发现绝大部分学生线下实验过程比较顺利,有极个别学生一边看仪器操作视频,一边操作仪器。这些说明,绝大部分学生能够进行网上预习,并且达到预习的目标要求,个别学生没有好好预习。为了起到监督作用,教师一方面要在网上进行巡查,删除无效贴;另一方面,在线下教学过程中给予临时看视频学习的学生以批评教育,并给予其预习成绩扣10分/次处理。这样线上评价和线下仪器操作表现相结合,可形成有效的预习评价,得到了学生的普遍认可。

4 教学效果、评价与体会

本线上课程重在实验原理与技术,与线下实验操作技能训练形成互补,能够解决传统纯线下课堂教学内容难和学时少的矛盾。本线上课程的开发和实施,以对学生进行思维能力训练为导向,也改变了传统的物理化学实验预习模式,预习评价相对较为客观,学生预习效果优良,进而为实现物理化学实验课堂的翻转提供了前提保证,也提高了实验教学效果。学生通过本线上课程预习后,进入实验室后可顺利完成相应的实验操作,并能够完成后期的数据处理、结果分析与讨论、撰写实验报告,课程通过率在95%以上。依据2021年我校教务系统中学生对课程的评价数据可知,学生对本课程的教学方法手段、知识和技能获得感等方面的满意度达97%以上(图4)。在参加浙江省一流课程认证时,同行专家鉴定认为本线上课程的建设有利于培养学生的思维和能力,提高了教学效果,对相关的实验类课程建设具有示范作用。近2年来,本线上课程累计接收了来自24所学校共1461人选课学习,累计访问次数42万余次。基于以上成效,本课程于2021年顺利通过了浙江省线上一流课程认证,并于2022年被推荐到国家高等教育智慧教育平台。这也是对本课程极大的鼓励和肯定。

评价号	评价指标	单项均值	满意度	权重	理论/实验
1	教学准备充分,严守讲台纪律,课堂管理到位。	98.46	98.462	0.25	实验
2	教学目标明确,过程顺畅,条理清楚,重点突出。	97.95	97.949	0.25	实验
3	教学方法手段适宜,能有效吸引学生的注意力。	97.95	97.949	0.25	实验
4	教学信息量足,课堂效率高。	98.97	98.974	0.25	实验
5	及时布置课后作业和学习任务,并认真批改或适时检查。	98.46	98.462	0.5	实验
6	关心学生成长,积极回应学生提出的学习困难和学习需求。	97.95	97.949	0.5	实验
7	学生在知识、技能方面很有收获。	97.44	97.436	1	实验

图4 学生的评价

通过本线上课程的实施,我们有以下两点体会:1) 在传统的教学中,任课教师一个学期每个实验需要讲授2-4遍(物理化学实验课一般进行小班化教学,每位任课教师通常一个学期平行教2-4个班级),本线上课程运行后,任课教师感到从多次重复地讲授原理、仪器操作解放了出来,能把更多的时间和精力用于实验过程的指导;2) 有了线上课程后,教师在线下实验课中并不是袖手旁观、无事可做,也不能像传统实验课那样面面俱到地讲授。如果教师对线下课堂不闻不问,预习效果得不到反馈和提升,学生的预习行为也得不到有效监督;如果教师还详细地讲授,就大大降低了线上课程的意义,反而摆脱不了学生对课堂讲授的依赖性,自然达不到翻转课堂的效果。

参 考 文 献

- [1] 物理化学实验原理与技术. [2022-10-16]. <https://www.zjooc.cn/course/2c91808481b87f5e0181e5ddda676557>
- [2] 物理化学实验原理与技术. [2022-10-16]. <https://higher.smartedu.cn/course/62fd6c6a1fdc0303f43aab26>
- [3] 郭建鹏. 中国大学教学, **2021**, No. 6, 77.
- [4] Akçayir, G.; Akçayir, M. *Comput. Educ.* **2018**, *126*, 334.
- [5] Strelan, P.; Osborn, A.; Palmer, E. *Educ. Res. Rev.* **2020**, *30*, 100314.
- [6] 李秋艳, 王晓军, 朱倩, 周颖, 钱香芸. 大学化学, **2021**, *36* (7), 2010086.
- [7] 王旭珍, 王新葵, 宋雪旦, 王新平, 石川, 纪敏, 田东旭, 陈冰冰. 中国大学教学, **2019**, No. 5, 38.
- [8] 周莉, 李澄. 化学教育, **2021**, *42* (16), 66.