

“综合+探究”式、模块化分析化学实验教学 ——“一生一方案”，因材施教实验教学法

姚奇志^{1,2,*}, 金谷¹, 朱平平¹

¹ 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026

² 国家级化学实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

摘要: 围绕以学生发展为中心的创新人才培养目标, 我们在多年持续教改和探索基础上, 提出了“综合+探究”式、模块化分析化学实验教学。要求学生在完成既定的综合实验基础上, 针对实验过程中发现的问题, 自主设计探究方案, 进行个性化实验探究; 同时, 将研究生组会研讨模式融入到本科生实验教学中, 增设方案答辩环节, 实现“一生一方案”的教学。该教学方法实施以来, 成效显著, 不仅激发了学生学习兴趣和实验潜能, 锻炼了实验思维和知识运用能力等综合实践能力, 而且开启了对求异思辨、创新能力的培养, 教学模式得到普遍欢迎和首肯。

关键词: 多层次分析化学实验; 模块化教学; 自主设计和探究; 一生一方案; 因材施教

中图分类号: G64; O6

Modular Analytical Chemistry Experimental Teaching Based on “Comprehensive + Exploratory” Experiments: “One Student, One Plan”, Individualized Experimental Teaching Method

Qizhi Yao^{1,2,*}, Gu Jin¹, Pingping Zhu¹

¹ School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

² National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, China.

Abstract: Focusing on the goal of innovative talent cultivation centered on student development, we have, over years of ongoing educational reform and exploration, proposed a modular analytical chemistry experiment teaching approach based on the “comprehensive + exploratory” experiments. The undergraduates are required to independently design experimental protocols for the problems discovered during the comprehensive experiments, and then conduct individual experiment. Meanwhile, the graduate seminar mode is integrated into the experimental teaching, through the inclusion of an experimental protocol defense, finally achieving the “one student, one plan” educational strategy. Since the implementation of this teaching method, significant improvements have been observed. The approach not only stimulates students’ potential interest in learning and experiment, but also enhances integrated practical skills including experimental reasoning and knowledge application. Furthermore, it paves the way for cultivating divergent thinking and innovative capabilities, receiving widespread acclaim and endorsement.

Key Words: Multi-level analytical chemistry experiment; Modular teaching; Self-design and exploration; “One student, one plan”; Individualized Pedagogy

收稿: 2023-09-19; 录用: 2023-10-19; 网络发表: 2023-10-27

*通讯作者, Email: qzyao@ustc.edu.cn

基金资助: 安徽省高等学校省级质量工程项目(2021jyxm1730, 2021xxkc205); 中国科学技术大学研究生教育创新计划教学改革研究项目(2020ycjg04); 中国科学技术大学本科质量工程项目(2020xjyxm066, 2020xy1kc011, 2021xjyxm080); 首批教育部虚拟教研室(大学化学实验课程群虚拟教研室)建设项目

分析化学实验课程是中国科学技术大学化学及相关专业本科生的必修基础课程。该课程在培养学生基本实验技能、创新思维能力、严谨实验作风、实事求是的科研品质和树立“量”的概念等方面发挥了重要作用。进入21世纪以来，课程组成员持续探索创新型人才培养的新路径、新模式，不断推进以“分析化学”为主体的多学科交叉的综合实验改革，更加突出以学生为实验主体、创新能力培养为范式的教学模式。课程从以技能训练为主的“三基”教育阶段，发展到知识拓展和能力提升的综合能力培养阶段，再提升到以创新思维能力培养的自主探究或研究实验阶段，构建了具有绿色化学特点的多层次、递进式分析化学实验课程体系(图1)。同时，在“扶-牵-引-放”四步教学法^[1]的基础上，进一步将研究生培养中的“组会”研讨模式引入到本科生实验教学中，在我校“分析化学实验II型”实验中，实施“综合+探究”式、模块化的“一生一方案”、个性化实验教学，不仅实现了教学的高阶性，而且进一步提升了教学的创新性和挑战度。激发了学生实验学习兴趣，拓展了学生的学术视野，学生创新实践能力得到大幅度提升，受到学生普遍认可和欢迎。2022年在全校344门课程中，获得教学评分排名第一；目前围绕教学实验内容，以本科生为第一作者发表教学论文9篇；该课程教学体系也获得2021年安徽省教学成果一等奖。

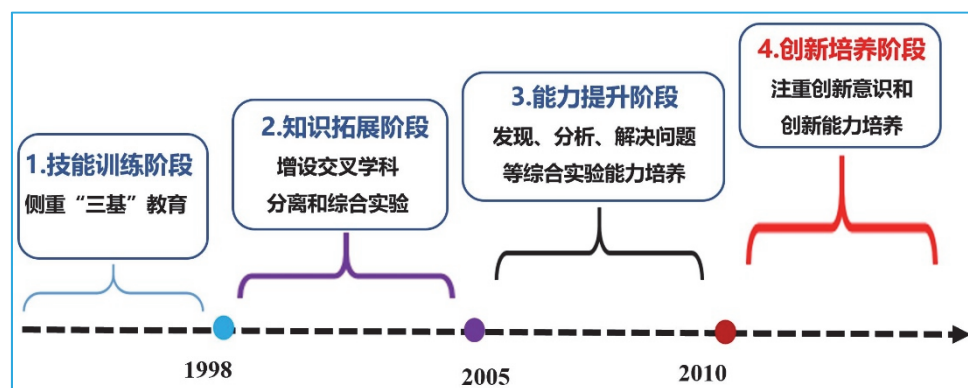


图1 分析化学实验课程体系发展历程

1 分析化学实验创新课程体系

1.1 创新课程体系的演进

1998年前，我校分析化学实验课程开设的是《定量分析化学实验》，内容为经典的酸碱滴定、配位滴定、氧化还原滴定和重量法，主要训练学生基本实验方法和技能，特别侧重定量分析实验能力和数据处理能力的培养。1998年以后，随着创新型大学建设，实验室建设资金投入大幅度增加，为实验教学改革和平台建设提供了可靠保证，我们增设了数个拓展学生综合实验能力训练的综合性实验，内容涵盖材料的制备、表面修饰、分离和测定等，学科涉及材料科学、无机/有机化学、高分子化学和生命科学等，如：PVA膜制备、改性及吸附分离应用实验，纳米羟基磷灰石的制备及成分分析^[2]。2010年以来，为了进一步提升学生创新思维和创新能力的培养，激发学生实验课学习的兴趣，我们在原有综合实验基础上，系统地设计和开发了系列探究、设计型实验项目，构建了“基础型-综合型-探究型-设计型”多层次、递进式分析化学实验创新课程体系(见图2)，内容包括25%的经典验证性基础实验，40学时；75%的综合、探究和设计实验，120学时。该课程体系既实现了对学生知识和技能的传授，也注重对学生综合实践能力和科研创新素养的训练。

1.2 “综合+探究”式、模块化实验教学法产生背景

教育部高等学校化学类专业教学指导委员会制订发布的《高等学校化学类专业指导性专业规范》明确了化学类专业人才培养的目标是：较好地掌握化学基础知识、基本理论和基本技能，具有创新意识和实践能力，能够在化学及相关学科领域从事科学研究、技术开发、教育教学等工作的人才。



图2 创新课程体系各实验项目类型分布

强调了实验教学在学生动手能力、科学素养、综合解决复杂问题的能力和创新能力培养上的重要性^[3]。在此背景下，许多高校都提出大幅度增加设计性实验，认为只有在设计性实验中，学生才能作为主体，在教师的引导下相对独立地提出问题、查阅资料、设计方案、完成实验、分析数据、得出结论，充分发挥其主观能动性^[4]。我校于2005年开始，每学期开设一个自主设计实验，时间2周、16学时。在教学中，我们发现设计性实验项目的确能够激发学习成绩优秀、自主学习能力强的学生实验潜能，使他们在查阅文献、独立思考、方案设计和理论知识运用等综合能力方面得到迅速提升，而对大多数低年级本科生来说，尽管他们对设计性实验充满激情，但由于知识储备有限，系统逻辑思维能力和独立解决问题的能力欠缺，自主设计实验的开设对他们来说形式大于成效，设计的实验方案系统性和可行性差，教学成效事倍功半，未能达到预期教学目标。为此，我们及时总结教改经验，结合学生在设计实验中对自己提出或设计的方案结果如何，有着强烈的好奇心和迫不及待的尝试欲望等特点，加大教改力度，增设梯度设计实验，开设“综合+探究”式、模块化实验教学：即由综合实验(既定实验方案)和探究实验(自主设计方案)构成一个完整的实验模块，学生在完成综合实验基础上，根据能力和兴趣选择探究目标，展开方案设计和实验探究。同时，为了让学生自主设计的实验方案更具有科学性和切实可行性，我们进一步改进教学方法，参照科研课题组研究生组会研讨的方式，增设自主设计方案答辩环节，取得了事半功倍的教学效果。该教学模式于2020年提出并在本人教授的实验班级尝试教学，得到全体教师和同学的认可后，2022年春季学期在我校分析化学实验II型课程全面实施。

2 “综合+探究”式、模块化实验教学法

2.1 “综合+探究”式、模块化实验教学法介绍

“综合+探究”式、模块化实验由综合实验和自主探究实验两部分组成，是分析化学实验II课程的主要教学内容，见表1。首先为学生提供统一的综合实验方案，学生按照方案进行实验。要求每位学生在实验过程中，注意观察和发现实验中问题，结合对实验数据的分析，寻找和确定自主探究命题或目标。课后通过文献调研和分析思考，自主设计实验方案，第二周进行实验验证。自主探究实验方案可以是对原综合实验的深入探究和拓展，也可以是对实验中异常现象或者某个实验条件的探究，具体方案由学生根据自己兴趣和进行选择。确保每位同学都能在自己的能力范围和兴趣点上开展实验，实现“我的实验，我做主”。

2.2 “综合+探究”式、模块化实验教学法案例

我们以“SDS (十二烷基硫酸钠)在 Al_2O_3 表面修饰及对 Cu^{2+} 分离、富集和测定”^[2]及其全过程探究实验为例，对教学过程和方法进行详细阐述。

表1 分析化学实验(II)教学内容(“综合+探究”式、模块化实验项目)

序号	综合实验名称	学生自主探究实验内容	教学学时数
模块一	SDS在Al ₂ O ₃ 表面修饰及用于Cu ²⁺ 的分离、富集和测定	表面修饰及应用全过程探究	8 + 8 = 16
模块二	海藻酸盐微胶囊的制备、药物包埋及缓释分析	微胶囊制备、药物包埋及缓释分析全过程探究	8 + 8 = 16
模块三	碘与水溶性聚合物分析方法建立	碘和水溶性聚合物分析方法全过程探究及应用拓展	8 + 8 = 16
模块四	吐温80盐水体用于混合溶液中Co ²⁺ 的分离	吐温80盐水体固液萃取机理探究	8 + 8 = 16
模块五*	硫酸钡反应历程探究(滴定法)	硫酸钡反应历程探究拓展	8 + 8 = 16
模块六	含铬废水的绿色处理及分析(自主设计实验)	含铬废水的绿色处理及分析方法建立	8 + 8 = 16
模块七*	混合溶液中Ca ²⁺ 、Ba ²⁺ 浓度测(自主设计实验)	混合溶液中Ca ²⁺ 、Ba ²⁺ 浓度测定	8 + 8 = 16

*备选实验项目

(1) 综合实验部分：教师提供统一实验方案。

首先全体学生按照实验教材、线上教学视频等资料进行课前预习，进入实验课堂按照教材上的实验方案，完成：① Al₂O₃微粒表面活化和自组装修饰实验；② Cu²⁺标准曲线绘制实验；③ 修饰后的Al₂O₃微粒对溶液中铜络合物的富集、分离实验；④ 采用分光光度法测定上清液中剩余铜络合物的浓度实验，获得各自的实验数据。

(2) 探究实验部分：自主设计实验方案，一生一方案。

课后每位同学对实验数据进行分析处理，得到去除率，并参照老师的实验结果(教师预实验对Cu²⁺去除率达到100%)，分析和寻找实验过程中可能存在的问题或异常现象，确定自己感兴趣的探究目标，展开文献调研和分析思考，各自设计后续探究方案，并制作答辩PPT。方案要求具有一定的新颖性、可行性和绿色环保。

方案答辩：第二周实验时，每位同学必须进行实验方案汇报和答辩(图3)，汇报内容：① 分析综合实验数据及结论，② 阐述发现的问题和探究目标确立的理由，③ 报告探究实验思路及可行性分析，汇报时间5分钟；在教师引导下，营造积极、开放的讨论氛围，鼓励全班同学参与讨论，提出质疑和论证，讨论时间5分钟。



陈述探究实验方案



全部同学质疑、讨论

图3 探究实验方案答辩现场

实验方案实施：学生根据答辩和讨论结果对实验方案进一步完善，然后各自准备试剂，展开实验。并将得到的实验数据共享到班级群。

撰写综合实验报告：实验结束后，学生根据综合实验和探究实验的过程和结果，撰写实验报告。在报告撰写过程中，学生可以根据各自需要借用班级群里的共享数据展开分析讨论，阐述结论。该教学模式的实施受到学生普遍欢迎，学生按照自己的能力和兴趣设计方案，想做什么，怎么做都交给学生。从根本上激发了学生的实验热情，极大地调动了实验潜能。这些不仅体现在答辩环节的热

烈讨论,更体现为实验设计方案的精彩纷呈(图4)。学生从各自的视角分别展开实验研究,有对改性微粒吸附动力学、软-硬酸理论验证等较深层次的实验研究,也有较简单的条件探究,如:pH值对表面修饰的影响等,实现“一生一方案”。

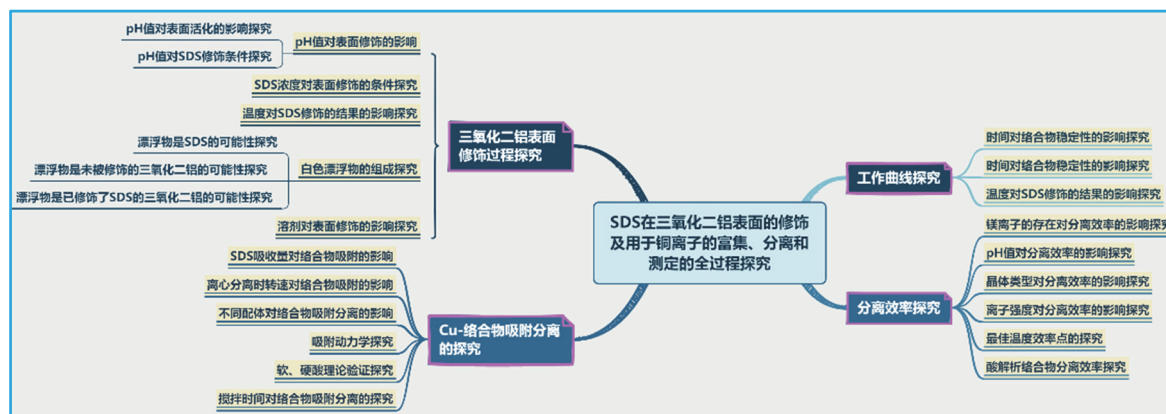


图4 学生设计的23种探究实验方案汇总

考评侧重对全过程和综合能力的全面评价:

通常,学生自主实验实施过程不会一帆风顺,各种意外、甚至得不到预计的结果等情况在所难免。因此,考核一定不能局限于结果的好坏,而应注重对实验全过程,特别是对设计方案、答辩情况,以及综合实验报告中对过程、结果分析的合理性等情况进行全面考量。考查标准为综合实验占30%,探究方案设计、答辩占30%,实验报告40%。

2.3 “综合+探究”式、模块化实验教学成效

(1) 因材施教,促进学生个性化发展:“综合+探究”式、模块化实验教学要求学生先完成综合实验,然后展开自主探究实验。充分尊重每位学生的知识和能力差异,实现个性化教学,使每位学生都能施展自己的“拳脚”。成绩好、思维活跃的同学可以对综合实验中较难的实验机理展开深入探究,做成小的科研项目;成绩中等、善于思考的同学可以选择综合实验中复杂步骤展开实验探究,对自己“天马行空”的想法进行验证;对于成绩和实验能力稍差的同学可以选择综合实验中相对简单的条件进行探究。在此过程中,不同层次的学生都必须经历从实验数据分析→发现问题→调研文献→思考分析→确定目标→设计方案→方案答辩→实施实验→撰写报告等一系列类似科学研究过程训练。在这个过程中,提升各自分析、发现问题,并解决问题的综合实践能力,体验实验研究带来的收获和自信,对各层次学生均达到最佳的教学效果。

(2) 拓宽了视野,提升科学实验思维 and 创新能力:探究方案答辩是教学中最重要的环节之一。依据综合实验过程和结果而展开的方案答辩,每位同学围绕相同的综合实验内容展开不同视角探究方案的讨论,这种同赛道、共频率的群体讨论,不仅使他们快速拓宽视野、发展思维,而且在与同伴的讨论中,学会分析、解决问题的方法和视角,提升同学们的求异思维、科学实验思维和创新思维,从而创造性地完成各自探究实验任务。经过一学期的实验训练,学生分析、归纳能力和表达能力显著提高,PPT制作越发精美、简洁。

(3) 强化了团队合作意识和协调能力:教学中,提倡学生可以共享实验数据,为实验报告撰写和讨论提供了丰富的数据支持。学生在分析问题时,可以借助同学的探究数据论证和说明自己的问题,完成的报告更加系统科学。因此,同学间常常相互协助,进一步深化探究方案,在原方案框架下,帮助对方完成部分条件实验,这种协调合作不仅扩大各自研究的深度和广度,也让学生体验了团队合作的重要性,提升团队协作意识和沟通执行能力。

(4) 促进教师不断提升专业能力和教学水平：与传统实验固定方案不同，探究实验方案由每位学生独自设计，“花样百出”的方案对教师的教学和指导能力提出挑战，迫使教师必须不断补充新知识、扩展教学视野；紧跟科研热点，丰富自身知识结构，在教学活动中不断反思、研究，不知不觉中，提高专业能力和教学水平。

“综合+探究”式、模块化实验教学，要求学生自己寻找并发现问题，按照科研的方式解决问题。学生综合实践能力，科学思维和独立解决问题的能力都得到明显提高。成效立竿见影，后续设计实验学生不仅能熟练查阅文献，运用所学知识，独立完成方案设计，并且方案的新颖性和可行性得到大幅度改善。同时，自觉融入绿色化学理念，整体实验水平显著提高。

教学模式的创新，不仅训练学生动手能力、综合解决复杂问题的能力和创新能力，也受到学生普遍欢迎和助教的肯定，学生感悟：“该教学模式极大调动我们的想象力和能动性，丰富了实验课题的原有内容，激发同学们对实验更为深入的思考……，既能培养我们的基础操作水平，又能锻炼我们查阅文献，创新思考等实际科研中所必需的能力……，总之，个人认为这样的模式值得推广”。助教评价：“有幸担任II型实验助教，更加体会到课程改革深入：学生完成既定综合实验教学内容后，可以按照兴趣发掘实验过程中感兴趣点进行探究实验，这种方式激活了同学们实验热情……这门课的精彩远不止于指定实验课的精准示范性，与之匹配的自主探究和设计性实验更是分析化学实验这门课的灵魂……不仅增强了大家的合作与交流，更是极大地激发了我们所有参与者的探索欲望……”。

3 结语

“综合+探究”式、模块化实验教学法是我们根据长年教学经验和学生特点，结合研究生培养方法而提出的尊重学生个性化学习的实验教学法，该教学模式实施以来，受到学生普遍认可和欢迎，教学评分全校第一。并多次应邀在首批教育部虚拟教研室(大学化学实验课程群)开展公开示范课教学。课程教学的高阶性、创新性和挑战度得到同行们一致认可。目前，已有十余位同学把探究或设计实验研究工作整理发表在《大学化学》、《化学教育》等期刊上，此外，多位同学在全国大学生化学实验创新设计比赛中荣获特等奖。

参 考 文 献

- [1] 姚奇志, 金谷, 朱平平, 李玲玲, 李娇, 刘红瑜. 大学化学, 2021, 36 (7), 2103003.
- [2] 金谷, 姚奇志, 江万权, 李娇, 刘红瑜, 王晓葵. 分析化学实验. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2020: 1.
- [3] 2006-2010年教育部高等学校化学化工学科教学指导委员会化学专业教学指导分委员会. 高等学校化学类专业指导性专业规范. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [4] 张树永, 张剑荣, 陈六平. 大学化学, 2009, 24 (4), 24.