

基于 PI 课题组引导的科创教育课程构建和拔尖人才培养初探——“微流控芯片实验室”通识教育教改研究

复旦大学化学系 方雪恩

摘要：在科创教育和拔尖人才培养中，如何挖掘当前全球前沿的科技问题，打造出针对不同阶段学生高质量的科创课程至关重要。高校 PI (Principal Investigator) 课题组是我国科学研究的前沿阵地，是科学问题的重要来源，打通高校 PI 课题组和青少年科创教育之间的桥梁，打造出前沿化、规范化的科创课程，对于拔尖人才培养意义重大。当前国家出台的系列针对青少年的科创教育，如针对中学生的“英才计划”，针对本科生的“强基计划”及“基础学科拔尖学生培养计划”等，都急需前沿化、规范化、课程化的科创培养素材。本报告聚焦高校 PI 课题组，以本人所教授的微流控芯片本科生通识课程为例，对“基于 PI 课题组引导的科创教育课程构建和拔尖人才培养”进行初探，包括整体理念、总体策略、具体措施、重点难点和创新点等，以期抛砖引玉，希望对有志于一线教学的高校 PI 课题组科研人员有所启示。

关键词：PI 课题组 科创教育课程 拔尖人才培养 微流控芯片

1. 项目的背景

21 世纪是人类科技突飞猛进的时代，中国经济到了必须改变发展模式、紧紧依靠科技创新的新阶段，并急需培养出世界一流的杰出科技人才。如何加强青少年学生科创教育和基础拔尖人才的培养，是摆在教育工作者面前的一项重要课题。2010 年 5 月 5 日，国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议，审议并通过《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020 年）》[1]，提出要深化教育教学改革，创新教育教学方法，探索多种培养方式，形成各类人才辈出、拔尖创新人才不断涌现的局面。随后教育部正式启动了“基础学科拔尖学生培养试验计划”，以回应“钱学森之问”，促进科创教育的发展和拔尖人才的培养。在 1.0 的基础上，2018 年教育部等六部门又启动实施“基础学科拔尖学生培养计划 2.0”（下称“拔尖计划 2.0”），围绕着进一步拓围、增量、提质、创新的总体思路，着力培养未来杰出科技人才，把我国建成世界主要科学中心和创新高地[2-4]。2021 年《中共中央关于制定“十四五”规划的建议》进一步明确指出，要深入实施科教兴才战略和人才强国战略，增强青少年学生的自主创新能力，加快科技教育发展，把科技创新教育放在优先发展的战略地位[5]。

科创教育是一种以项目学习、问题解决为导向的课程组织方式，它强调知识跨界、场景多元、问题生成、批判建构、创新驱动，充分体现课程综合化、实践化、活动化的诸多特征。科创教育对于通过理论与实际的相互渗透，激发学生对学习的渴望，培养对科学的热情、

启迪科研探索的智慧具有非常重要的作用[6-8]。在科创教育和拔尖人才培养体系中，如何挖掘前沿的科学技术问题，并形成有效的高质量科创教育课程打造和输出，需要我们不断地思考和探索。

创新问题源于一线的科学实践，问题的发现往往需要良好的土壤，高校PI (Principal Investigator) 课题组是我国科学研究的最前沿阵地，打通高校PI 课题组和青少年学生科创教育之间的桥梁，对于打造出前沿化、规范化的高质量课程、探索建立拔尖人才的培养的新途径，意义重大。

当前国家出台了很多科创人才培养的计划，如“中学生英才计划”[9]，“基础学科拔尖学生培养计划”，“强基计划”以及省市一级如北京市“翱翔计划”，南京市的“星光计划”，陕西省的“春笋计划”及上海中学生拔尖人才培养计划等。这些计划的其中重要内容之一都包含了给学生提供一种优异科创环境，尤其是前沿课题实验室的氛围熏陶，帮助学生形成持久的科研兴趣。前沿化、规范化、课程化的优秀的科创课程输出至关重要，尤其须要跟研究生培养的创新课题探索有所区分[10]。

如本项目基于前沿交叉技术——芯片实验室或称微全分析系统是由瑞士 Ciba-Geigy 公司的 Manz 与 Widmer 在 1990 年提出。它是通过化学、微机电加工 (MEMS)、计算机、电子学、材料科学与生物学、医学和工程学等交叉来实现芯片实验，即实现实验的整体微型化、自动化、集成化与便携化，是未来人类发展重大科技之一。本课程为全校性通识教育创新创业专项课程，授课对象为本科低年级各专业学生，

通过本课程金，让学生充分体验到化学前沿科技的进展，并让学生感受到科学——技术——产业转化的战略重要性。

本研究报告基于微流控芯片教改项目，着力于“基于PI课题组引导的科创教育课程构建和拔尖人才培养初探”（Principal Investigator-guided Science and innovation education, 简称为PI-SIE 科创教育模式），初步探讨我们在科创教学工作中形成的理念、策略、具体措施以重点难点和创新性，以期抛砖引玉，对有志于一线教学的高校PI课题组科研人员能够有所启示，助力科创教育的良性发展。

2. PI 课题组引导科创教育和拔尖人才培养理念、策略和具体实施方法和过程

2.1 PI-SIE 科创教育模式理念和思路

高校 PI 课题组作为高校要力量，承担了国家、省市各类重大的前沿科技项目。高校 PI 课题组可以为学生提供最鲜活、最立体和最前沿的科创课题，基于此，打造各类优秀的前沿化、规范化课程，引导和培养学生对科研的兴趣，引领其进入学术大门，培养未来科技创新的中坚力量。打通高校 PI 课题组和青少年学生科创教育与拔尖人才培养的桥梁，探索出一条体系完整、特点突出，运行模式独树一帜的面向青少年的科创教育新途径至关重要。

我们的总体理念和思路是：基于高校 PI 课题组前沿研究内容，针对国内初/高中学生和高校本科学生的特点，有针对性地打造出各类前沿化、规范化的科创教育课程，并借助各种渠道进行输出，具体而言：

1) 基于课题组前沿研究内容，打造相关规范化课程，包括：a. 开放式课程（主要是指在一定的相对成熟的技术平台框架内，瞄准一个科学问题或社会技术需求，进一步明确目标、把握课题深浅，通过头脑风暴，形成具体详细的解决方案和思路，实现从开题、调研、实验到结题等过程）和 b. 规范式课程（该课程有比较明确具体的研究目的、研究内容、研究路线，甚至是具体实验步骤，着重在于让学生初步了解该领域所涉及的一般性知识，激发兴趣点，为后续进行开放式课题研究打下基础）。在这方面，我们着重强调基于青年少的学习

阶段特点，针对性地建立规范化、课程化的科创课程培训，该课程的定位我们觉得应该介于学校常规教学课程和研究生探索式科研之间，尤其应当跟PI课题组常规的研究生培养区分开来。

2) 在科创课程打造的基础上，通过高校本科培养和科创平台，将PI课题组的科创课程渗透到各阶段学生中，完成开题、实验、分析、结题等环节。并通过各种反馈机制，持续打磨和升华课题质量，形成优质课程。

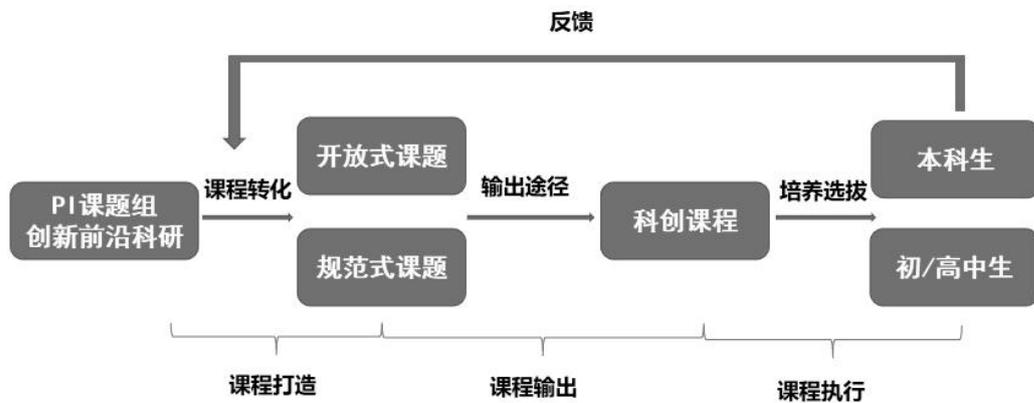


图 1. PI 课题组引导科创教育课程构建和拔尖人才培养的理念和思路

2.2 PI-SIE 科创教育模式总体策略和具体措施

下面结合本课题组的研究内容——微流控芯片前沿研究课题，基于以上的理念和思路，针对不同阶段学生，分别阐述具体策略和措施，以期抛砖引玉。

首先介绍下微流控芯片技术，该技术是由瑞士 Ciba-Geigy 公司的 Manz 教授在 1990 年提出，它是通过化学、微机电、计算机、电子学、材料科学、医学和工程学等交叉来实现实验操作的微型化、自动化、集成化与便携化，是人类未来发展的重大科技之一。

本课程学习活动主要内容包含：课堂讲解、课程实践、主题讨论和期末答辩。

课堂讲解主要由教师讲授微流控芯片相关基本概念，基本逻辑和应用案例等。在课堂授课过程中，设置 2-3 个随堂测试题目，并让学生现场直接完成并通过学习通等软件提交。

课程实践，主要是围绕着微流控芯片某个主题，设计创新实验，在实验室中让同学进一步了解微流控芯片，并锻炼实践动手能力。

主题讨论，该板块主要通过翻转课堂、头脑风暴等形式，以学生讲授、组队互动、教师点评为主，并且根据该课程的性质特点，逐步完成商业计划书。

期末答辩环节：本课题会聘请校内、校外两位专家学者，学生在规定时间内完成特定项目的答辩，依据项目创新性、商业可行性、学生答辩表达、时间控制和回答专家提问五个维度，由专家现场打出分数，以此作为期末测评分数。

2.2.1 本科生阶段学生科创课程及培养模式初探：

本科阶段的学生拥有了自己的专业知识，明确了专业学习的方向，其学习能力和自律性大大增强，有独立思考的能力，可以通过大学图书馆资料，进行独立主动的资料查阅；在实验操作上，也具备了一定的实践能力，并且也非常愿意进入课题组训练，为后续研究生工作打下基础。针对国内高校本科生的这些特点，在科创教育中，通过1) 学校基本培养方案和科创平台(如复旦大学有非常多针对本科生的科创培养体系)；2) 校内各类科技创业比赛以及由企业设置的各类科创课题和3) 本科实验教学平台，课题组PI根据自有的研究特色，在一个相对成熟的技术平台框架内。瞄准一个科学问题和社会技术需求点，明确目标、把握好课题深浅，通过头脑风暴形式，跟学生互动形成具体的解决方案和思路。如本课题组在教育部“基础学科拔尖学生培养计划2.0”(项目编号：20222064)课题的资助下，将分析化学前沿课题——微流控芯片规范化、课程化，并渗透到本科低年级段，尝试打通“前沿科研—科创课程—人才培养”全链条，以此建立培养和筛选优秀拔尖人才新模式、新途径，具体完成了以下具体工作。

1) 基于本课题组离心式微流控芯片技术(*Anal. Chem.*, 2020, 9454 - 9458, *Anal. Chem.*, 2020, 14297 - 14302, *Anal. Chem.* 2021, 93, 9, 4270 - 4276)，我们首先打造了一个开放式科创课程。2020-2021 学年，两位大一学生，通过复旦大学启明星科创计划，进入该课程学习，通过头脑风暴、多次讨论，针对转基因大豆快速鉴定需求，撰写并递交了“微流控芯片实验室的构建及其在分子(转基因

大豆核酸)检测中的应用”课题,并获得学校立项,经过一年多的研究,成功完成了大豆核酸提纯、分离及微流控分子快速鉴定,最终获得校结题优秀项目,也比较好的达到了该科创课程的基本学校要求。基于该科创课程学习后,赵晋同学后进入清华大学攻读研究生、继续深造。在本科创课程中,我们利用我们课题组开发的离心式微流控芯片技术,首先打造出适合低年级本科生的前沿化、规范化科创课程,具体来说,针对转基因大豆快速鉴定需求,由他们提取大豆核酸(基于他们的基本知识,已经在理论上知晓细胞、核酸等基本概念)、设计核酸扩增引物(通过查询基因数据库,利用引物设计软件设计引物探针)、进行芯片分析和体系的性能评估(包括特异性、敏感性和实际样本的测试)。在这个过程中,两位学生基于其掌握的基本知识,相互配合、独立地完成了整个课题,并且提出了后续创新想法。在这个课程中,我们并非直接让本科生建立前沿创新方法或技术,而是在先前搭建好的平台技术的基础上,根据他们的专业知识和适当的实验操作,完成预设的实验,一方面巩固了原有的知识,另一方面拓展了微流控前沿知识和实验操作,并完成了非常有意义的课题,激发了科研兴趣,为后续继续完成创新性科研打下了基础。通过课题组建立的平台型技术,打造开放式课程,开放给低年级本科生进行科创训练,激发能力、引导兴趣、逐步引领学生进入更高阶段的学术科研,这需要PI课题组将前沿课题课程化,而不是将研究生创新课题直接让本科生完成。

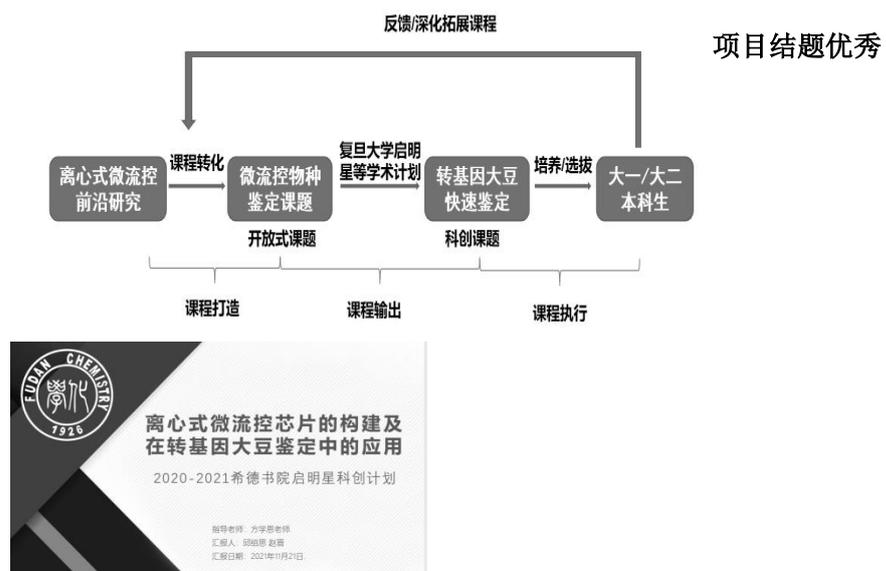


图 2 基于创新前沿研究-学术计划-开放式课程的本科生科创教育及拔尖人才培养

2) 进一步，我们通过全国大学生生化创新实验设计大赛的平台，打微流控核酸科普类课程，由三位本科学生承担，成功立项了科普类课程——“玩转芯片、让 DNA 看得到”，向大众传播科学知识，获得了第四届全国大学生化学实验创新设计大赛华东赛区二等奖（科普赛道）和上海市第十七届上海大学生化学实验竞赛一等奖（科普赛道）。通过此次前沿课题的科普化，将微流控、核酸等元素进一步带入大众视眼，培养了学生对前沿科学的感觉，并且获得了良好的社会效益。基于此李欣泽同学进一步获得了学校望道项目的支持，而唐艾佳和石雅宁同学获得了学校曦源项目的支持。同时三位学生都获得继续深造的机会、保送攻读硕士研究生。该项目其实对学生有了更高的要求，除了完成基本的学术研究外，他们需要摆脱高深的学术性语言、以科普语言的形式，对社会公众或者没有该方面专业知识的大众进行科普

宣传，进一步锻炼了学生的语言组织能力、对微流控芯片的更高理解能力。通过高水平赛事的牵引，充分调动起学生和老师的积极性，通过创新课程的不断打磨，达到可以进行大范围推广的程度。

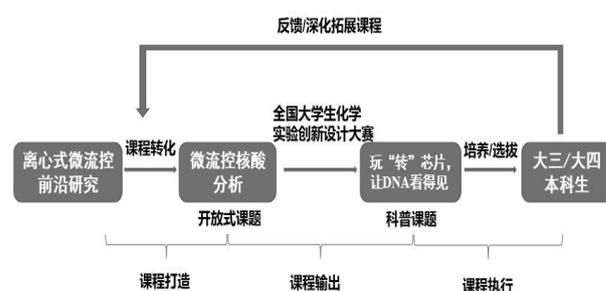


图 3 基于创新前沿研究-创赛-开放式课程的本科生科创教育及拔尖人才培养

3) 从 2018 年至今，申请人以独立主讲人方式先后开设了“通识—基础—专业”课程体系，包括大类通识教育课程《微流控芯片实验室》（全校性创新创业课程），大类基础课程《普通化学实验》（上海高校市级重点课程）和专业课程《微流控生命分析》，已经完成了 5 个学年的课程讲授。因此利用本科理论/实验教学的途径，我们基于课题组前沿课题研究——离心式微流控芯片，打造了适合全年级本科生学习的科创课程（微流控免疫 PCT 定量测量），并融入到上述常

规课教学中，截止目前，已有 200 多位学生参加该科创课程，使本科生接触到世界相关领域的最新的研究成果，培养其对该领域的兴趣。通过这种方式，目前已经有 5 位学生先后进入本课题组，完成了研究生学习和培养，多位学生获得了第 2021 年第十七届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛特等奖，其中一位学生还获得了 2023 年度国家奖学金。

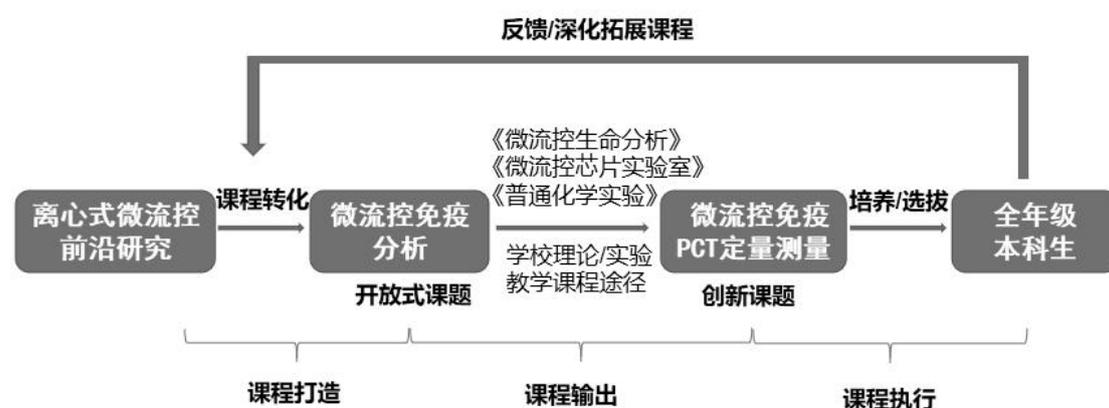


图 4 基于创新前沿研究-学校课程-开放式课程的本科生科创教育

当前化学学科发展迅猛，新理论、新方法不断涌现，部分实验教科书上的内容，已无法满足学生了解最前沿知识的需求，因此我们补充了原先的化学实验教学教程，并积极引导提升学生查阅文献、汲取学科前沿知识的能力；目前已在复旦大学、北京大学、南京大学、上海交通大学等 30 余所著名高校推广，起到了良好的示范和推广效果。通过学校实验课程的途径，积极将课题组的前沿研究内容渗透其中，推广到广大相关专业本科生中，是一条非常不错的科创教育途径。

除了微流控芯片技术，其他化学类前沿项目，如基于纳米材料独特光、电、磁效应建立的分析检测技术、智能药物递送系统技术、生物分子探针成像技术、基于介孔材料的能源转化、基于微纳米材料的柔性能源存储技术和基于创新材料的化学催化剂研制技术等，都可以用来转化成针对不同阶段本科生的开放式科创课程，引导其进入不同的前沿研究领域。但对于低年级本科生来说，我们认为将研究生课题直接放给本科生做不但达不到理想的培养效果，而且在一定程度上，会由于各种原因（如本科生的时间分配，知识储备以及创新课题的复杂性等），会挫败学生对科研的热情。

总而言之，针对国内高校本科生的特点，基于学校基本培养方案、科创平台和实验教学，基于PI课题组的研究热点，形成开放式科创课程，开放给学生，进行科创教育锻炼，是拔尖人才培养的非常有效的途径。同时在顶层设计上，社会教育系统，包括行政管理部门和学校单位等可以积极思考、制定相关政策，积极鼓励PI课题组参与到这样的科创教育活动，形成高端人才培养的新途径、新范式。

2.2.2 国内初/高中学生（包括国际高中学生）：

相比于高校本科阶段学生，国内初/高中学生虽然已经具备了一定的基础科学知识，一定的独立思考和是非判别能力，但大部分学生依旧缺乏实验动手能力，无法完成一个完整的研究类课题。如果PI课题组此时将前沿课题直接开放给学生，很难得到良好的效果，学生也无法从中获得有益的帮助。并且很多情况下适得其反。当前很多人

才计划，因为缺乏对科创素材提供端强有力的引导和激励，未能达到更加有效的科创教育效果。

基于该阶段学生的特点，课题组首先需要将前沿课题通过讲座、组织参观等形式，将基本概念、基本知识等通过浅显易懂的语言，传递给学生，然后通过规范式课程设置（该类型课题有比较明确的研究目的、研究内容、研究路线，甚至具体实验步骤，着重让学生初步了解该领域所涉及的一般性知识，激发兴趣点），实现科创课程的打造和输出。当然对于特别优秀的高年级学生，可以尝试组建导师团（由初/高中学校老师、高校 PI 课题组导师和研究生组成），基于课题组研究课题，提出若干个方向，进入初/高中学校课堂，与学生进行探讨，头脑风暴，最后由学生自己提炼出具体研究/调研/解决方案，进行立项，在导师团的指导下，进行具体研究/调研、数据分析、中期汇报、结题等工作。本课题组针对国内初/高中学生，做了部分科创教育方面的工作。

1) 通过复旦大学“步青计划”——面向高中学生的科创教育计划，我们凝练出系列微流控芯片规范式课程，进入国内著名初/高中，在规定的时间内，完成规范化的微流控相关实验，并完成 PPT 答辩汇报，指导的部分高中生已经在《学步邯郸》、《复旦大学学报》等刊物中发表文章，总体上起到了非常好的学科兴趣引领作用。

2) 本课题组跟国内若干国际高中等合作，打造了“诺贝尔火炬计划”，开发了系列基于微流控芯片技术的规范式课程，其中包含肿瘤标志物糖蛋白分析、中国芯——微流控芯片项目、微流控 DNA 纳米

项目、纸上微流控芯片和穿戴式微流控芯片等为期五天的科创教育项目，先后已有 20 多位学生完成了课题研究和答辩。在这个过程中，通过国际高中与高校之间的协议，通过一定的有偿服务（包括科研经费的拨付和个人报酬的获取），实现对带教老师的引导和激励，同时也完成对科创素材和教学质量的有序良性考核。在具体教学过程中，指导老师对学生 PPT 汇报（英语）进行点评，并为部分优秀的学生撰写了出国深造推荐信，以便学生申请到优秀的海外学校，目前已经有多位学生进入斯坦福、哈佛等国际名校。我们希望未来能建立一个完整的科创网络平台，引入更多 PI 课题组的前沿技术，包括如先进材料/能源、智能分析、生物合成等，实现课题组前沿课题与初/高中学生的桥梁纽带，实现更加广泛有效的科创教育，使 PI 课题组承担更多的社会责任。

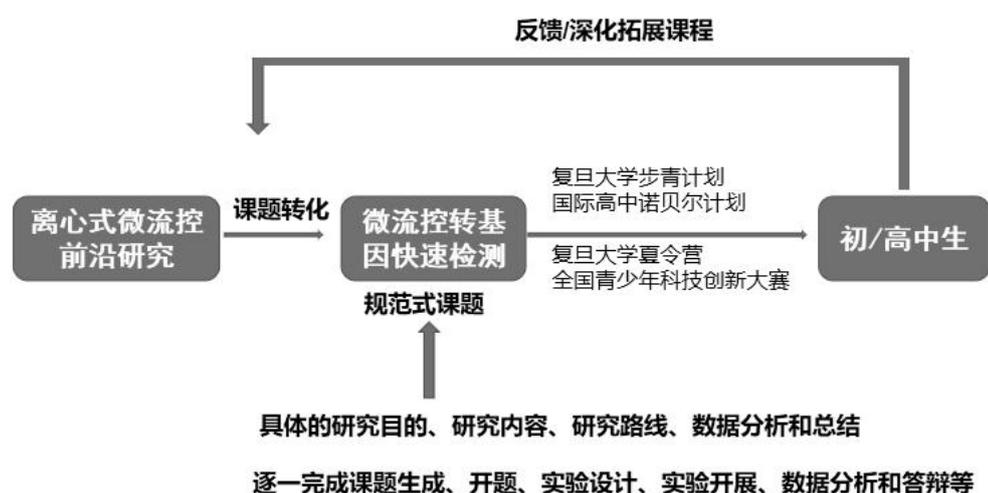


图 5 基于创新前沿研究-规范化课题的初/高中学生科创教育模式

3. 科创教育教改项目的主要成效与价值

通过本项目和科创教育理念的引入和实施,总体上学生学习积极性有交大改善,尤其是引入学习通等软件,引入课程的科创实践和校内校外专家打分制后,进一步调动了学生学习和教师教学等积极性和主动性,促进了教和学。从具体期末考核和平时课堂表现,综合打出每位同学的得分,从得分来看,属于良好的正态分布。优秀的同学明显上课积极主动、能够非常优秀的完成期末汇报,对科创实践表现出极大的兴趣点。总体上在教学上,本人通过积极引入最前沿的知识,配合一定的实验视频/现场演示,能够明显调动部分学生对学术的强烈兴趣。同时在本教改项目的过程中,发表了基于以上教改内容的高水平教学论文 2 篇。

4. PI 课题组引导科创教育及拔尖人才培养的重点/难点及创新/特点

1) 高校 PI 课题组除了承担各类科研项目,对于如何引导其进一步完成科研成果高质量的科创教育课程建设,对我们国家科技发展和人才培养意义重大,也是本论文讨论的重点。如何在课题组自身学术研究的基础上,调动其在科创课题研究、设计和开发方面的积极性和动力,针对不同阶段的学生,打造合格优秀的规范式/开放式课程,而不是泛泛的让学生在实验室跟着研究生完成碎片式的实验活动,或是拿研究生的部分科研成果完成科创项目的结题,都需要一定的顶层

设计和政策引导(比如科研成果落地转化和科创课程转化作为课题组科研成绩的考核点);

2) 本课题的第二个难点和重点在于如何将 PI 课题组打造的创新科创课题, 通过不同渠道, 输出到不同阶段的学生, 并形成良性反馈机制, 实现优秀拔尖人才的培养。这方面可以通过国家、省市重大赛事的牵引, 或者单位科创平台的搭建, 以此充分调动学生和老师的科创积极性, 实现完整科创课题的执行。

除了重点/难点外, 该科创教育模式的具有如下创新和特色:

1) 高校 PI 课题组基于自身研究的前沿和特色课题, 打造出开放式/规范式科创课题, 使得科创内容更立体、更饱满, 很好地对接科学研究最前沿的阵地。

2) 基于课题组研究特色, 打造针对不同阶段(包括国内初/高中、国际高中和本科学生), 形成规范式和开放式两种科创课题, 以便于适应不同阶段和多层次的人才。

3) 通过整合不同科创渠道(包括本科阶段各项创新教育计划活动、学术创新体系或者联合社会科创教育运营机构), 实现创新课程在不同阶段学生中的渗透。

4) 探索引入体制内和体制外力量, 充分调动 PI 课题教研组从事科创教育和拔尖人才引导的动力, 释放课题组在社会人才培养中的活力。

综上所述，本研究报告重点讨论和探索了高校PI课题组在前沿科创课题的研究，高质量科创课程的打造与拔尖人才培养的新途径和新模式，通过一定的顶层政策设计，充分发挥课题组在科技教育中的积极性和动力，引导其在拔尖人才培养中的积极作用。通过这样的培养渠道创新，摆脱灌输式教育和应试教育带来的桎梏，培养学生对科学的热情、提高发现问题和解决问题的能力。最终形成体系完整、特点突出、运行模式独树一帜的面向青少年的科创教育及拔尖人才培养新途径和新范式，为培养未来中国中坚科研力量和自己的学术大师做好人才储备。

参考文献

- [1] 国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020 年）
- [2] 基础学科拔尖学生培养试验计划进展报告[M], 2009.01-2011.12. 北京: 高等教育出版社, 2012: 4-5
- [3] 教育部等六部门关于实施基础学科拔尖学生培养计划 2.0 的意见, 2018, 中华人民共和国教育部公报。
- [4] 王娟, 杨森, 赵婧方. “拔尖计划” 2.0 背景下提升创新人才培养质量的思考与实践[J]. 中国大学教学, 2019(3):19-24.
- [5] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要, 人民日报, 2021 年。
- [6] 张莉, 尹龙, 谢红燕, 等. 基于创新创业能力培养的“五位一体”实践教学模式研究[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(4):186-188.
- [7] 景旭锋, 全面振兴本科教育背景下“科创项目”提升育人成效的实践路径, 教育观察, 2022.11(7), 62-68
- [8] 崔明石, 吴振利, 师范专业实施科创教育的策略, 中国高校科技, 2022•1-2
- [9] 李娇, 金谷, 姚奇志, 李玲玲, 刘红瑜, 中学生英才计划——以 2019 年英才计划化学学科夏令营为例, Univ. Chem. 2021, 36(6), 2008019, 1-5.
- [10] 王益彤, 郝京诚, 中学生英才计划的“进阶式培养”模式, Univ. Chem. 2019, 34(7), 38-41