

· 管理纵横 ·

2011—2020 年间美国国家科学基金对物理教育研究领域资助情况分析

张萍^{1†*} Ding Lin^{2†} 徐祯¹

1. 北京师范大学物理学系, 北京 100875
2. 俄亥俄州立大学教育学院, 美国俄亥俄哥伦布 43210

[摘要] 物理教育研究在美国已经有 50 多年的历史, 被公认是物理研究领域的一个分支方向, 列入国家科学基金的支持范围, 持续性资助物理教育研究对物理教学实践和科学育人非常重要。本文依据美国国家科学基金会网站的数据, 从资助项目数量、资助资金数额、资助来源路径、资助研究方向四个方面, 对 2011—2020 财年间美国国家科学基金会对物理教育研究领域的项目资助情况进行分析和综述, 为中国国家自然科学基金委员会科学制定发展战略, 深化教育与具体学科教学研究的交叉融合, 推动我国物理教育研究的发展, 科学培养创新人才提供参考和借鉴。

[关键词] 物理教育研究; 美国国家科学基金; 基金资助项目

物理教育研究 (Physics Education Research, PER) 是用科学实证的研究方法研究物理教育教学中存在的问题, 探明问题成因, 研发有效解决方案, 提高物理教育教学质量。物理教育研究不仅需要物理专业知识还需要与其他很多研究领域交叉融合, 包括教育学、教育心理学、语言学、认知科学、测量与统计、计算机科学和人类学等。

在过去的几十年, 美国的 PER 快速发展取得卓越成就, 使这个新兴的学科在物理学界的地位日渐提高, 发展成为一个物理界公认的学术研究领域, 1999 年美国物理学会 (American Physical Society, APS) 发布了一份声明, 认定物理教育研究是物理研究领域的一个分支方向^[1], 2005 年 APS 旗下的权威物理杂志 *Physical Review* 系列刊中新增了 *Physical Review-Physics Education Research* 子刊^[2], 标志着 PER 的地位与传统的物理科学研究如原子、分子和光学物理、凝聚态物理、高能/粒子物理等学科并列, 也是物理学研究的一个分支领域。目前在美国至少有 40 所大学提供 PER 的博士学位, 包括哈佛大学和斯坦福大学等。PER 领域的研究



张萍 北京师范大学物理学系教授, 2018—2022 年教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会委员, 物理教育研究和研究专项委员会主任。中国物理学会教学委员会委员。主要研究高等物理教育和科学教育。曾在哈佛大学、悉尼大学和俄亥俄州立大学访问和工作。



Ding Lin 美国俄亥俄州立大学教育学院教授, 北京师范大学客座教授。美国国家科学基金 (NSF) 评审专家, 主要研究高等物理教育、STEM 教育和科学教育。

者大多数是在大学物理系工作, 有坚实的物理专业背景, 讲授本科生和研究生的物理课程, 一些 PER 学者同时也从事物理科学研究, 有两位诺贝尔获奖者 Kenneth Wilson (Nobel Prize 1982) 和 Carl Wieman (Nobel Prize 2001) 将 PER 作为他们的研究方向之一。在美国, 物理教育研究领域的成功令人惊叹, 在提高物理教育教学质量方面, 已经产生了大量基于研究的理论知识。更重要的是, 这些理论

收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2021-12-28

* 通信作者, Email: zhangping@bnu.edu.cn

† 共同第一作者

知识已被物理教授广泛应用于他们的教学实践中, PER的成功主要得益于国家科学研究基金的集中和持续性支持^[3]。Henderson等人^[4]的研究数据表明:2006—2010财年间美国PER领域约有75%的资金来自国家科学基金(National Science Foundation, NSF)。Khatri等人^[5]调查了在美国大学的科学、技术、工程和数学(Science, Technology, Engineering and Mathematics, STEM)课程中得到广泛应用的43种创新教学方法,其中每一种教学方法的开发者都获得了至少300万美元的外部资金,主要来源于NSF的标准资助项目和持续资助项目,持续时间至少是10年。

长期以来我国物理人才培养主要以实践者的经验为基础,近几年伴随物理教育教学改革,越来越多的物理教育专家意识到使用科学实证的研究方法研究物理教育的重要性。2019年9月,在郑州召开的中国物理学会(Chinese Physical Society, CPS)2019年秋季会议中设立了物理教育分会,2020年CPS与APS联合举办了中美物理教育国际会议(线上)。2018—2022年教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会中第一次设立了物理教育改革和研究专项委员会(以下简称“教改研专委会”),为了推动中国PER领域的发展,教改研专委会和《物理与工程》杂志共同邀请国内外专家撰写“PER综述”和“PER研究方法入门”系列文章,介绍PER领域的历史、进展和科学研究范式^[6-9]。2021年7月在长春召开的教改研专委会2021年学术年会中首次开设物理教育研究方法的培训课程,引导大学物理教师用科学实证的方法研究人才培养规律、改进教学、培养高质量物理人才。近十年中国PER学者已经有10余篇研究成果发表在国际物理教育研究权威期刊*Physical Review-Physics Education Research*上。目前在中国PER还是一个较新的研究领域,没有得到学术界的广泛认可,无论是国家社会科学基金还是国家自然科学基金或其他基金基本上没有设立专

门为PER提供资金的项目。

本文通过对2011—2020十年间美国NSF在PER领域的立项数据进行统计分析和内容解析,揭示美国NSF资助PER领域的概况、资助项目来源路径、资助的主要研究方向和发展趋势。为中国国家自然科学基金委员会科学制定发展战略,推动我国物理教育研究的发展,科学培养高质量人才提供参考和借鉴。

1 数据来源

首先依据布尔检索的方式,在NSF的数据库中^[10]对同时包含“Physics”和“Education”两个关键词的资助项目进行检索,设定检索立项时间范围为“2011年1月1日—2020年12月31日”,然后对检索得到数据进行清洗整理。依据项目标题与摘要进行人工筛选,确认PER项目共计1004项,总金额约6.7亿美元。由于物理学与大多数科学与工程学科密不可分,本文数据中的一些PER项目与STEM教育研究项目存在交叉。

2 NSF资助PER项目概况

2.1 资助项目数量和资金数额

2011—2020财年间每年NSF资助PER项目的数量和经费总额情况见表1,NSF平均每年资助PER项目约100项,年资助总金额在5000多万美元至8000多万美元间不等,平均单项获得资助金额约为67万美元。

2.2 PER项目研究时间跨度

不同的PER项目执行年限不同,项目时间跨度分布如图1所示,多数PER理论研究项目研究期限为3~5年;执行年限较短(<3年)的项目多为PER研讨会和学术会议等;资助年限较长(>6年)的项目多为大型的合作研究、新课程开发、PER成果推广、教师发展培训等。

表1 2010—2020财年间每年NSF资助PER项目数量与金额统计表

年份	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
资助项目数	93	106	93	119	99	121	111	76	91	95
资助总金额(万美元)	7169	8496	5522	7976	5524	8176	5824	6141	6690	5615

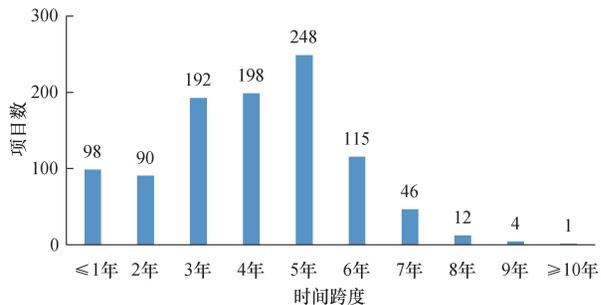


图1 2011—2020年间NSF资助PER项目执行时间跨度的统计

2.3 标准资助和持续资助

NSF 资助项目分为两类：标准资助项目 (Standard Grant) 和持续资助项目 (Continuing Grant)。仅仅发展 PER 的理论知识是不够的，PER 的主要目标之一是将新理论应用于教学实践，持续性资助教育研究对教学实践的影响非常重要。在标准资助项目取得良好进展，需要进一步深入研究、将理论付诸于实践（如物理课程资源开发与共享）、将理论和实践的成果进行推广（如教师培训）等情况下，可以申请获得持续资助项目。我们的统计数据表明：2011—2020 财年间 PER 获 NSF 持续资助项目 213 项，资助总额为 2.5 亿美元，约占 PER 总资助额的 37%。

3 NSF 资助 PER 的路径分析

3.1 各科学部资助 PER 项目情况

NSF 共包括七个支持科学、工程研究和教育的

学部，每个学部下设若干个处，如图 2 所示。物理学由于其广泛的研究内容，构成了大多数理科与工科教育课程的一部分，因此物理教育研究、物理教育实践以及相关跨学科研究项目与多个研究领域紧密联系。数据统计表明：2011—2020 年间 PER 获得来自 NSF 的 7 个学部中 19 个处的项目资金资助（图 2 中底色为白色的 19 个处）。其中，教育与人力资源部 (Education and Human Resources, EHR) 是 PER 项目的主要资助来源，数学与物理科学部 (Mathematical and Physical Sciences, MPS) 逐年增加对 PER 的项目支持力度。2011—2020 十年间这两个部门对 PER 提供的资助总额约为 6.2 亿美元，占 PER 总资助金额的 93%。

3.2 教育与人力资源部

美国国家科学基金会由 EHR 负责推动各科学领域的人才培养和工程教育，涵盖了从学前教育到职业发展的各个阶段^[11]，支持美国各级 STEM 教育在多样化的环境中的卓越表现，培养科学家、技术人员、工程师、数学家和教育工作者以及知识渊博的公民等多元化人才以及准备充分的劳动力。EHR 是物理教育研究最大的项目资助来源，统计数据表明 2011—2020 的十年间，EHR 为 PER 领域提供了 803 项基金项目支持，提供资金共计约 5.8 亿美元，平均单项金额约 72 万美元。这些项目来源于 EHR 下设的 4 个部门，其资助任务目标如下：

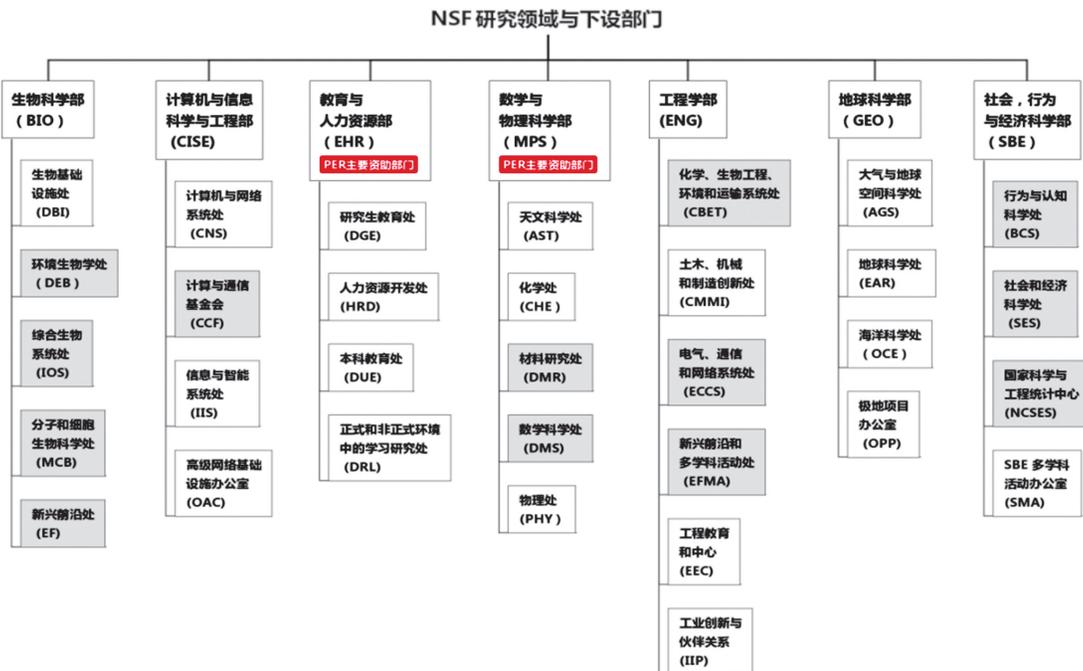


图2 NSF 支持的研究领域分布与 PER 获得项目资助的来源路径 (所有底色为白色的部处都为 PER 项目提供过资助)

(1) 本科教育处 (Division of Undergraduate Education, DUE) 专注于通过改进课程、教学、实验、基础设施 (建设)、评估、学生和教师的多元化以及合作来加强两年制和四年制教育机构的 STEM 教育;

(2) 正式和非正式环境中的学习研究处 (Division of Research on Learning in Formal and Informal Settings, DRL)。通过在正式和非正式学习环境中促进所有 STEM 学科的学习和教学的创新研究、开发和评估, 来改善所有年龄段的学生 STEM 学习;

(3) 人力资源开发处 (Division of Human Resource Development, HRD) 主要支持和促进旨在加强对服务不足群体的 STEM 教育、扩大他们在劳动力中的参与并增加关于包容性计划的活动;

(4) 研究生教育处 (Division of Graduate Education, DGE) 主要提供资金支持研究生和开发新颖、创新的项目, 以培养未来 STEM 领域的领导者。

3.3 数学与物理科学部

数学与物理科学部 (Mathematical and Physical Sciences, MPS), 2011—2020 年十年间为美国的 PER 领域提供了约 66 项基金项目支持, 提供资金共计约 4 400 万美元, 平均单项金额约 66 万美元, 项目主要来源于 MPS 下的物理处 (Physics, PHY) 和天文科学处 (Astronomical Sciences, AST)。

物理处除了传统的物理研究领域如原子、分子、光学物理和等离子体物理; 生物物理; 基本粒子物理; 引力物理; 核物理; 理论物理等, 还设置了物理综合活动 (Integrative Activities in Physics) 研究领域, 支持物理学和其他学科之间的跨学科研究, 在这里可以申请 PER 资助项目, 包括改善物理专业本科生和研究生的教育和培训活动, 例如研究开发本科高级物理课程、研究生物理专业前沿课程及 PER 理论研究等。

4 NSF 资助 PER 项目的研究方向分析

PER 的主要研究方向分为: 概念理解 (Conceptual Understanding)、问题解决 (Problem-Solving Performance)、课程与教学 (Curriculum and Instruction)、评价 (Assessment)、态度与信念 (Attitudes and Beliefs about Teaching and Learning)、认知心理学 (Cognitive Psychology) 以及教育技术 (Educational Technology)^[12]。从数据统计分析看在 2011—2020 十年间获得 NSF 资助的

PER 项目中有 81% 的项目研究归入了上述的 7 个主要研究方向。其余 19% 的资助项目为跨学科教育、物理教学资源与课外学习资源的开发、物理教师发展与 PER 成果传播推广项目等。

为了更仔细分析 NSF 对每个研究方向的资助信息, 本研究将每个 PER 项目按照上述 7 个主要研究方向进行 1~7 编码标注, 一些项目中包含一个以上研究方向, 对应标注了一个以上编码, 然后按照每一个研究方向的编码进行数量统计。2011—2020 年间 PER 各研究方向每年获得 NSF 资助项目数统计结果如图 3 所示。

“课程与教学”是研究者持续关注热点问题, 也是 NSF 资助 PER 的重点研究方向, 每年资助的项目数在 30~60 项, 主要研究内容是基于物理课程的育人目标和物理课程教学中遇到的实际困难开发适合的教学方法与教学策略, 实证研究其有效性。“概念理解”“问题解决”在物理教学中占有重要地位, “评价”是物理教学过程的关键要素, 这三个研究方向在 PER 领域起步较早, 数据显示在近十年中每个方向年资助项目数量基本维持在 30 项左右。“教育技术”是近年来新兴的研究领域, 利用技术支持物理教学、在线物理课程、虚拟物理实验室、以及实证研究“技术+物理”的教学效果等研究项目越来越多地得到 NSF 支持。下面介绍两个典型的 PER 项目:

(1) 项目名称/项目号: 基于类比推理研究和提高大学生综合问题解决能力/ # 1252399^[13]

来源: 教育与人力资源部 (EHR) 下设的学习研究处 (DRL)

资助金额: 943 013 美元

研究起止日期: 2013 年 9 月 1 日至 2017 年 8 月 31 日 (已结项)

项目类型: 标准项目

研究方向: 问题解决

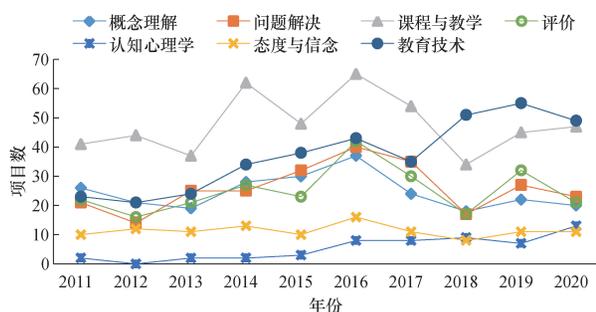


图 3 2011—2020 财年间 PER 各研究方向每年获得 NSF 资助项目数统计

研究内容简介:该项目旨在调查研究和提高大学生解决物理综合问题的能力。与传统的教科书中的习题不同,综合问题更接近真实世界的情况,仅仅使用选择公式进行计算的方法很难解决问题,它要求学生能够正确调用并协调使用在不同课程中学过的多个概念和原理,利用科学研究的思维方法努力地寻求成功的解决方案。该项目建立在类比推理的框架上,主要研究三方面问题:(1)识别和描述学生和专家在解决物理综合问题时所使用的方法有什么差异;(2)评估和比较为提高学生综合问题解决能力所设计的各种类比推理方法;(3)实证研究哪些教学方法可以成功提高学生综合问题解决能力。

培养学生解决问题能力是物理课程中的一个重要目标,也是物理教学的难点问题。在教学实践中很多物理教师都经验性地认为深度讲解课程内容、让学生练习大量教科书式的难题就可以有效地提高学生的问题解决能力,然而效果并不理想。这个项目使用科学实证的研究范式,通过研究来识别问题成因、研发解决方案,科学评估教学的有效性,将教学视为一门科学。

(2)项目名称/项目号:基于研究提高学生量子力学的理解/ #1806691^[14]

来源:数学与物理科学部(MPS)下的物理处(PHY)

资助金额:556 312 美元

研究起止日期:2018年9月1日至2022年8月31日(预计)(在研项目)

项目类型:标准项目

研究方向:课程与教学

研究内容简介:该项目的主要任务是开发本科生量子力学课程资源,用于支撑量子力学互动式研讨课(Quantum Interactive Learning Tutorials, QuILT)和在课程中有效地使用同伴教学法(Peer Instruction, PI),目的是帮助学生理解量子力学中具有挑战性的主题,培养未来的科学家和工程师,满足高科技对量子力学日益依赖的需求。在课程资源研发过程中关注下面几个方面:(1)强调以教育研究为基础,关注学生的认知,系统研究学生学习量子力学遇到困难;(2)强调建模和激励学生积极参与学习过程,引导学生先对特定现象和情境进行预测和推理,在此基础上教师再给予适当的反馈;(3)利用可视化工具帮助学生建立关于量子过程的物理直觉,弥补量子力学中抽象数学形式和定性预测、解释物理现象之间的鸿沟;(4)研发的课程资源由多个

模块组成,每个模块相对独立完整,可以方便地与其他教学资源组合、灵活地应用于教学的各个环节。

QuILT和PI都是以学生为中心的教学方法,强调学生自主学习和合作学习。要使教学方法改革成功落地,必须开发和建设适合新教学方法的课程资源。开发课程资源需要历经研究、开发、应用、评估和改进等多个环节,是一项具有挑战、并且花费大量时间和精力的工作。目前国内的教学改革多数是“新教学方法+传统教学资源”的模式,这样“刷漆式”改革,很难带来好的育人效果,也是导致人们对教学方法改革产生怀疑和诟病的主要原因^[15]。

5 整合物理科学研究与物理教育

NSF最大的特色之一就是研究将研究和教育进行了融合,在STEM各领域的研究者和教育者之间建立了广泛联系,他们共同进行课程开发、教师培训和人才的发现与培养^[16]。“整合教育和研究,支持发展具有尖端能力的多样化STEM人才”是美国2014—2018年NSF战略目标^[17]。NSF2018—2022年科学研究项目评审的重要指标之一是“研究与教育相结合,加强学习与探究之间的联系”。其中的关键要素包括:“是否为激励未来的科学家、工程师和教育工作者提供了丰富的环境”“是否为教师和学生(K-12、本科、研究生和博士后)提供参与研究活动的机会”^[18]。

在数据检索过程中,我们发现在大多数物理科学研究项目中都整合了物理教育和物理人才培养的任务目标,例如:建设科普网站向公众普及物理前沿进展、将最新研究理论开发成适合教学的资源、研究开发物理前沿课程、对学生开放科研实验室以及暑期学校培训项目等任务。这些物理科学研究项目本身并不是PER项目,但是众多物理科学家在从事尖端研究活动的同时肩负起物理教育和科学传播的责任,利用他们在物理研究的专业化和前沿性等方面的优势与PER的专家合作,为物理教育和人才培养的做出贡献。在中国,PER领域缺少物理科学研究专家、特别是前沿物理学家的积极参与,其他学科教育研究领域也存在相同的问题。

6 启示

本文重点分析了美国NSF对PER领域项目资助情况,在“基于学科教育研究”(Discipline-Based Education Research)的其他领域:如STEM教育研

究、化学教育研究、生命科学教育研究、地球和大气教育研究等领域,几十年来也都得到美国 NSF 持续有力的资助。在下面的讨论中我们仍以 PER 为例,一些结论和建议同样适合其他学科教育研究领域。

建成世界科技创新强国需要科学培养创新人才,创新人才的培养离不开教育研究,教育研究理论真正落地教学实践,必须与具体学科的课程教学相结合。吴岩说“课程是教育最微观、最普通的问题,但它要解决的却是教育中最根本的问题——培养人。课程是中国大学普遍存在的短板、瓶颈、软肋,是一个关键问题^[19]”。因此,仅仅发展宏观的教育研究不能解决教育的微观问题,我国迫切需要发展“基于学科的教育研究”。以“物理教育研究”为例,它不仅需要教育学、心理学、神经科学、认知科学、技术深度的交叉融合^[20],还必须与物理学专业相结合,才能真正实现在物理课程中科学育人。

目前我国科学基金对教育科学基础研究的资助大致从三个层面进行了布局:一是基础规律层,包括认知与学习规律、知识生产与知识进化规律、教学交互规律的研究等;二是技术方法层,包括学习环境建设与评价、学习资源与认知工具、教育大数据技术等方面的研究;三是实践创新层,主要包括教育治理、教育评价、教学方法、教育内容、教育供给侧改革等方面的研究^[21]。从本文对美国 NSF 对 PER 的情况分析可以发现,这三个层面的研究都没有真正落地于具体的专业课程中,因此建议我国的科学基金进一步推进教育跨学科交叉,加强科学研究和人才培养的融合,将 PER 纳入国家自然科学基金等研究基金的资助项目范围,吸引和支持优秀物理人才进入这个研究领域,用科学方法研究人才培养规律,将科学育人落地于课程教学,从根本上解决“教育中最根本的问题——培养人”,为我国建成世界科技创新强国培养高质量人才^[22]。

参 考 文 献

- [1] The American Physical Society. 99.2 Research in Physics Education. (1999-05-21)/[2021-10-20]. http://www.aps.org/policy/statements/99_2.cfm.
- [2] APS. Physical Review: Physics Education Research. [2021-10-20]. <https://journals.aps.org/prper/>.
- [3] 张萍,丁林,Charles H. 美国研究基金支持下的物理教育研究及其对高等物理教育的影响. 物理, 2019, 48(9): 610—611.
- [4] Henderson C, Barthelemy R, Finkelstein N, et al. Physics education research funding census// AIP Conference Proceedings, New York: AIP Publishing, 2012: 211—214.
- [5] Khatri R, Henderson C, Cole R, et al. Characteristics of well-propagated teaching innovations in undergraduate STEM. International Journal of STEM Education, 2017, 4(1): 1—10.
- [6] Ding Lin, 张萍. 美国物理教育研究: 历史回顾和前瞻. 物理与工程, 2018, 28(1): 29—34.
- [7] Ding Lin, 张萍, 贾泽皓. 物理教育研究中的量化研究方法. 物理与工程, 2019, 29(3): 3—7.
- [8] Ding Lin, 申亚琴, 张萍. 物理教育量化研究方法: 调查研究与描述统计. 物理与工程, 2019, 29(4): 3—6.
- [9] Ding Lin, 张萍, 徐祯. 物理教育研究中的实验/准实验研究. 物理与工程, 2021, 31(1): 3—7.
- [10] National Science Foundation. [2021-10-20]. <http://www.nsf.gov/awardsearch>.
- [11] 王珏, 郑永和, 汪寿阳, 等. 国际科学基金资助战略研究. 北京: 科学出版社, 2012: 218—219.
- [12] Docktor JL, Mestre JP. Synthesis of discipline-based education research in physics. Physical Review Special Topics-Physics Education Research, 2014, 10(2): 020119.
- [13] Investigating and Improving Synthesis Problem Solving Skills in Introductory Physics Via Analogical Reasoning. (2018-09-01)/[2021-10-20]. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1252399&HistoricalAwards=false.
- [14] Improving Student Understanding of Quantum Mechanics via Research. (2018-09-01)/[2021-10-20]. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1806691&HistoricalAwards=false.
- [15] 张萍, 冯金明, 梁颖. 国家级一流本科课程的结构框架和实现路径——基于翻转课堂的实践与研究. 中国大学教学, 2021(7): 40—44.
- [16] 孙海华, 张礼超. 美国国家科学基金会的重要资助举措及启示. 中国科学基金, 2021, 35(4): 663—671.
- [17] National Science Foundation. Investing in Science, Engineering, and Education for the Nation's Future—National Science Foundation Strategic Plan for 2014-2018. (2014-03-10)/[2021-10-20]. <https://www.nsf.gov/pubs/2014/nsf14043/nsf14043.pdf>.
- [18] National Science Foundation. Building the Future Investing in Discovery and Innovation—NSF Strategic Plan for Fiscal Years (FY) 2018-2022. (2018-02-12)/[2021-10-20]. <https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18045/nsf18045.pdf>.
- [19] 吴岩. 建设中国“金课”. 中国大学教学, 2018(12): 4—9.
- [20] 黄璐, 朱一鹤, 陈丽, 等. 科学基金资助 F0701 的科学计量分析. 科学学研究, 2019, 37(6): 977—985.
- [21] 陈丽, 郭玉娟, 王怀波, 等. 新时代信息化进程中教育研究问题域框架. 现代远程教育研究, 2018(1): 40—46, 87.
- [22] 徐祯, 张萍, Ding Lin. 基金支持下基于物理教育研究开发物理课程的案例分析. 物理与工程, 2021, 31(5): 4.

Analysis of Funding for Physics Education Research by The National Science Foundation of The United States Between 2011 and 2020

Zhang Ping^{1†*} Ding Lin^{2†} Xu Zhen¹

1. *Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

2. *Department of Teaching and Learning, The Ohio State University, Columbus OH 43210, USA*

Abstract Physics Education Research (PER) has a history of over 50 years in the United States (US) and is recognized as a legitimate subfield of physics supported by the National Science Foundation (NSF). Continuous funding for PER is crucial for physics instruction and cultivation of scientific literacy. Drawing from the database archived on the website of the NSF in the US, this paper provides a summative analysis of the PER funding trends in the US around four aspects: numbers of NSF sponsored PER projects, dollar amounts of funding, funding sources, and research directions of funded projects between 2011 and 2020. This paper offers useful implications for the National Natural Science Foundation of China in terms of the development of strategic plans, enhancement of physics education and PER in China, and research-based training of physics talents.

Keywords Physics Education Research; National Science Foundation; funding

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: zhangping@bnu.edu.cn

† Contributed equally as co-first authors.