

考察一位科学教师的学科教学知识：基于替代性映射法的成分间互动研究

赵云威

中国农业大学人文与发展学院，北京 100193，中国

摘要：本研究考察一位科学教师在讲授七年级物理主题——功 / 能与简单机械——的过程中，其学科教学知识（pedagogical content knowledge, PCK）各成分之间的互动，旨在揭示这些成分如何相互关联并影响教学实践，尤其是在面向资优学生的教学情境之中。研究采用质性研究设计，以课堂观察为主要数据来源，运用替代性映射法（Alternative Mapping Approach, AMA）分析 PCK 成分的互动——该方法是对 Park 和 Chen（2012）映射法的改造；并以内容分析和持续比较法对数据加以阐释，进而构建细致的 PCK 互动图。研究得到四项主要发现：第一，PCK 互动图具有主题特异性，在复杂度与结构上彼此不同；第二，学生相关因素——如学习困难、错误概念以及资优学习者的特征——显著影响了教师的教学决策；第三，教师的教学策略知识在发起互动中居于核心地位，而学生知识则在应对教学挑战时至关重要；第四，情境因素，尤其是资优学生的需求，促成了拓展性活动，这些活动展现出课程知识与其他 PCK 成分之间的动态互动。本研究引入替代性映射法这一新工具，用以捕捉 PCK 成分互动的复杂性与先后次序，为 PCK 研究作出贡献；同时表明，在理解 PCK 于真实课堂中如何被实施时——尤其是面向资优学习者的差异化教学——必须重视情境维度与质性维度。

关键词：实施性学科教学知识；资优教育；映射法；物理主题；PCK 精炼共识模型

Examining a Science Teacher's Pedagogical Content Knowledge: Interactions among Components through an Alternative Mapping Approach

YunWei Zhao

College of Humanities and Development Studies, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: This study investigates the interaction of a science teacher's pedagogical content knowledge (PCK) components during the instruction of seventh-grade physics topics—work/energy and simple machines. It aims to explore how these components interconnect and influence instructional practices, particularly in the context of teaching gifted students. The study employed a qualitative research design, using classroom observations as the primary data source. It utilized the Alternative Mapping Approach (AMA), an adaptation of Park and Chen's (2012) mapping-out method, to analyze PCK interactions. Content analysis and the constant comparative method were applied to interpret the data and construct detailed PCK interaction maps. The study yielded four key findings. First, PCK interaction maps are topic-specific and differ in complexity and structure. Second, student-related factors—such as learning difficulties, misconceptions, and characteristics of gifted learners—significantly influenced pedagogical decisions. Third, the

teacher's knowledge of instructional strategies played a central role in initiating interactions, while knowledge of learners was crucial in addressing instructional challenges. Lastly, contextual factors, particularly the needs of gifted students, required enrichment activities that demonstrated dynamic interactions between knowledge of curriculum and other PCK components. This study contributes to PCK research by introducing the Alternative Mapping Approach (AMA) as a novel and effective tool for capturing the complexity and sequence of PCK component interactions. It highlights the importance of considering contextual and qualitative dimensions in understanding how PCK is enacted in real classroom settings, particularly in differentiated instruction for gifted learners.

Keywords: Enacted pedagogical content knowledge; Gifted education; Mapping-out approach; Physics topics; Refine consensus model of PCK

一、引言

学科教学知识（PCK）指教师针对特定学生群体与情境设计并实施有效教学的专门能力[1-3]。该概念最初由 Shulman[3] 提出，它超越单纯的学科内容知识，强调如何以最佳方式把内容传递给学生。近期研究凸显了 PCK 在提升教师教育质量与教学品质方面的关键作用，为改进教学实践提供了循证路径[4]。教师具备扎实的 PCK，对改善学生的学习结果有显著贡献[5]。

在这一基础认识之上，越来越多的研究开始探讨 PCK 在各科学学科中的发展与应用。以物理教育为例，已有研究考察了静电力与电场[6]、力与运动[7] 等主题；化学教育方面则有电化学[8]、溶解度[9] 与乳酸 等主题的研究；生物教育方面涉及进化 与生物多样性 等领域。此外，科学与工程教育领域通过课例研究（Lesson Study）以及在高等教育情境中开展的调查 推进了 PCK 研究。这些研究虽富有价值，但主题的广度仍显不足，这说明持续开展跨学科研究、扩大教师教育研究的范围与影响，仍有其必要。

尽管科学教师的 PCK 已被广泛研究，但其课堂落实层面仍存在明显空白。例如，把 PCK 与学生学习结果直接关联起来的证据尚不充分，考察 PCK 如何具体塑造教师课堂行动的研究亦为数不多。因此，未来研究应更多关注师生互动，并考察教师在教学过程中如何回应学生的观念[5]。此外，探讨文化背景、学习水平与个体差异如何影响教学实践，也可能带来有价值的洞见[6]。由计划、教学与反思构成的实施性 PCK 教学循环，同样值得在多样的科学主题中作进一步考察。由于 PCK 具有内在的主题特异性[7]，更多研究可以揭示特定科学概念教学中的长处与短处[8]。尽管研究成果丰硕，PCK 的概念界定仍不一致，这表明有必要形成标准化的研究路径。再者，已有研究多聚焦于教学决策，对互动性课堂阶段的关注则明显不足。填补这些空白，有助于厘清教学循环如何影响学生的学习结果[9]。

PCK 中一个长期被忽视的方面，是其各成分之间的互动。许多研究者都强调需要进一步探究这些互动（如[10]）。然而，覆盖全部成分的综合性研究仍然有限，而考察这些成分如何在教学中整合的明确方法也尚未成熟。为填补这一空白，Park 和 Chen 的映射法呈现了 PCK 成分之间的互动，为教师教育者提供了有价值的分析工具，并有助于教师教育项目的设计。该方法虽阐明了实施性 PCK 循环，却也存在局限：它把成分之间的互动一律视为强度相同，无法区分互动的质量[11]，也忽略了互动的方向性与复杂性。此外，它对学生学习结果等情境因素的处理并不充分，而这些因素对教师的 PCK 影响甚大。为克服上述问题，Park 和 Suh 提出对映射流程与视觉呈现方式作出调整，以更好地纳入这些情境影响。

有鉴于这些局限，本研究旨在考察一位科学教师在讲授功 / 能与简单机械这两个物理主题时，其 PCK 各成分之间的互动。指导本研究的研究问题是：在讲授功 / 能与简单机械时，一位科学教师的 PCK 各成分如何相互作用？

近年来物理教育领域的 PCK 研究虽有增加,但与化学、生物和技术教育相比仍显不足。以 CoRe 为基础的 PCK 研究多集中于生物与化学,少有研究关注物理教师在建构 CoRe 过程中的 PCK (Aydeniz 和 Gürçay, 2018)。一项针对 2015—2021 年 35 项 PCK 研究的全国性元综合分析,仅识别出一项与物理相关的研究。此外,物理教师的 PCK 水平通常偏低,尤其在内容知识方面;其教学法知识与课程知识处于中等水平,而学生知识与内容知识仍较为薄弱。有鉴于这些空白,本研究强调有必要考察与物理相关的 PCK,以洞察教师的胜任力并识别可改进之处[6]。

本研究着眼于真实课堂情境中的实施性 PCK,对教师教育项目与持续性专业发展具有重要启示。其主要贡献包括:(1)依据 Park 和 Suh 的提示,以一种替代性映射法(AMA)弥补既有方法的局限,从而对教师在整堂课中的 PCK 作出全面分析;(2)运用 AMA 揭示与 PCK 成分相关的课堂互动;(3)考察一个涉及资优学生的独特学习情境。资优学习者具有若干显著特点,如学习速度快[12-13]、动机水平高、提问倾向复杂,这些特点影响着教师对 PCK 及其各成分的运用,并相应地塑造这些成分。理解这些学生特征如何影响教师的实施性 PCK,可显著推进科学教育研究。

(一) 本研究的理论框架

由 Shulman[3] 提出的 PCK,已被广泛用作理论框架,在多样的情境、方法与目的下支持科学教师的专业成长[14]。为消解各类界定上的差异、提供一个具有普遍适用性的框架,研究者近年发展出精炼共识模型(Refined Consensus Model, RCM)。RCM 整合了既往模型的要素,其中尤以 Shulman[3] 与 Magnusson 等[2] 的模型为要。本研究采用 RCM,以与 PCK 文献中既有的术语体系保持一致,并特别聚焦于该模型的核心成分——实施性 PCK(enacted PCK, ePCK)。ePCK 指教师的知识与技能[1],包含针对特定科学教学内容的计划、教学与反思三个过程。Carlson 和 Daehler 将其界定为:

“实施性 PCK 是某位教师在特定情境中、面向某位学生或某一学生群体、以使这些学生会某一特定概念、某组概念或该学科某一特定面向为目标,所动用的具体知识与技能。”(第 83 页)

此外, Gess-Newsome[1] 把 ePCK 描述为:“个人 PCK&S 是以特定方式、为特定目的、面向特定学生讲授某一特定主题,以增进学生学习结果的行动。”(第 36 页)在该成分的发展过程中,教师参与由计划、教学与反思构成的教学循环。这一循环使教师得以反复精炼其对特定主题的教学,从而增强其 ePCK。改进源自两类反思过程:(1)行动中的反思与(2)对行动的反思,二者塑造着未来的教学计划,并提升教师清晰讲解科学概念的能力。在 ePCK 之内,反思被视为教学推理。此外,源自师生互动的学生学习结果,也显著影响着这种教学推理。

RCM 虽为本研究提供了理论框架,但由于 PCK 各成分在 ePCK 中并非完全可见,仍需辅以其他模型。要揭示教师在教学过程中的实践与思考,还需要补充性的模型;RCM 本身缺乏考察教学过程中 PCK 成分间互动的工具。为此,本研究把 Magnusson 等[15] 广受认可的 PCK 模型作为第二框架加以运用。Magnusson 等[16] 识别出五个 PCK 成分:

1. 科学教学取向(Science Teaching Orientation, STO):反映科学教师关于特定主题教学之目标与宗旨的信念与知识。

2. 学生知识(Knowledge of Learners, KoL):涵盖教师对其学生的了解,包括理解特定概念所需的前提条件,以及错误概念、学生易感困难等方面。

3. 课程知识(Knowledge of Curriculum, KoC):涵盖教师关于特定主题之目标、目的、材料与课程方案的知识。

4. 教学策略知识 (Knowledge of Instructional Strategies, KoIS): 既包括学科通用策略 (如探究式学习、问题式学习), 也包括讲授特定主题时使用的主题特定策略 (如模拟、类比或活动)。

5. 评价知识 (Knowledge of Assessment, KoA): 涉及教师对科学学习各维度及其评价方法的理解。

(二) 科学主题教学中“互动”的界定

PCK 成分之间的互动, 指的是它们的相互整合——教师同时动用两个或更多成分, 以发起、维持或结束既定的教学。例如, 在引入某一概念时, 教师可能运用某一成分来处理学生的另类概念、克服学习困难, 或提供动手活动。KoL 成分所反映的学生学习结果, 也可能促使教师借助其他成分作出调整, 从而连贯地应对意外或不利的情形[2]。

Park 和 Chen 开展了一项关于 PCK 成分互动的综合性研究, 提出了“映射法”。该工具阐明了在教师作出教学决策的过程中, 一个成分如何塑造其他成分。他们采用五边形模型——该模型假定各成分之间的相互关系是对等的——分析教学片段并绘制细致的 PCK 图, 从而便于比较不同的教学实践。

不过, Magnusson 等[2] 的模型把 STO 置于优先地位, 认为它影响其他成分。他们强调 STO 与其他成分之间的互动, 却未论及 KoIS 与 KoC、或 KoL 与 KoA 之间的互动。但他们也指出, 各成分之间的连贯互动对有效的科学教学与 PCK 发展而言不可或缺。因此, 本研究采纳 Park 和 Oliver 五边形模型所主张的对等互动视角。鉴于学界对 PCK 成分互动的研究日益增多, 本研究采用替代性映射法 (AMA), 以进一步厘清 PCK 成分如何互动、以及科学课堂在实践中是如何被建构起来的。

(三) PCK 成分互动研究综述

理解 PCK 成分之间的互动已成为科学教育研究的核心议题, 有助于洞察教师如何整合其知识以促进学生学习。早期研究把 PCK 成分视为彼此分立的实体[17], 而近期工作则强调考察它们在课堂中的动态互动。尽管有这些进展, 目前仍无标准化方法可对这些互动作全面分析。Park 和 Chen 开创性的映射法把成分之间的关联可视化, 显示学生知识 (KoL) 与教学策略知识 (KoIS) 之间互动频繁, 而课程知识 (KoC) 的整合程度最低。他们还指出评价知识 (KoA) 虽作用重要却常被忽视, 尤其是在非正式评价当中。然而, 该方法后来因把互动一律等同看待、忽视其复杂性与方向性而受到批评。此后的研究对该方法作了进一步改进。Aydın 等表明, 导师指导改善了职前教师对各成分的整合, 尤以 KoC 为著。Akın 和 Uzuntiryaki-Kondakci 发现, 经验丰富的教师比新手教师更有效地整合各成分, 凸显了教学专长的作用。Ottogalli 和 Bermudez 则揭示, 在生物多样性教学中 STO 与 KoL 之间存在紧密整合, 而 KoA 的整合程度依旧最低。

研究还表明, 成分整合的状况因教学经验与情境而异。Demirdöğen 等指出, 职前化学教师主要整合 KoIS 与 STO, KoL 则呈现不足。Sickel 和 Friedrichsen 发现, 职业生涯早期的生物教师起初优先关注课程与策略, 随后才逐步纳入学生理解与评价。与之类似, Bayram-Jacobs 等观察到, 教师往往能有效发展 KoL 与 KoIS, 而 KoA 则常被闲置, 这与既往发现一致。此外, Barendsen 和 Henze 还指出教师自我感知的 PCK 与实际课堂实践之间存在落差。尽管进展显著, 仍存在两方面的空白: 对物理教育的关注不足[27-28], 以及对学生特征等影响 PCK 互动的情境因素考虑不周。本研究通过引入替代性映射法 (AMA) 来填补这些空白——该方法把情境因素与质性分析纳入映射过程之中。与既往路径不同, AMA 承认 PCK 成分之间互动强度存在差异, 从而更深入地洞察教师的实践。通过专门聚焦物理主题 (功 / 能与简单机械), 本研究为一个尚待充实的研究领域作出贡献, 全面呈现教师在真实课堂情境中如何动态整合 PCK 成分。

二、研究方法

本研究采用带有诠释取向的基础质性研究设计。为考察科学教师 PCK 成分之间的互动,研究以目的性抽样选取一位科学教师作为个案,这呼应了 Shulman 的论断:在 PCK 研究中每位教师都构成一个独特的个案。个案研究允许在真实情境中探究当代现象,尤其适用于情境与现象之间界限不清的场合。因此,本个案研究以整体性方式收集与分析数据,以揭示真实课堂教学过程中 PCK 成分之间的互动。

研究参与者通过目的性抽样选取,以清晰界定个案并保持研究焦点——这一做法适用于个案研究。本研究对既有数据作二次分析。由于初始研究以资优学生为对象,招募面临诸多困难,包括可参与学生数量有限、班级完全由资优学生组成、进入现场受限以及自愿参与的要求。这些约束使得最终仅选取一位参与者:一所招收 6—14 岁资优学生的私立学校的初中科学教师。她拥有物理学学士学位、固体物理学硕士学位,并通过教师教育培养项目取得教师资格证书。她三年的教学经验,使本研究得以考察学生学习结果与学校情境如何影响其 PCK 图。

(一) 研究情境

本研究在首都一所隶属于国民教育部的私立初中开展。该校执行面向七年级的国家科学课程,与公立学校所用课程相同,但会对教学加以充实与差异化,以满足资优学生的需要。参与者包括十二名被鉴定为资优的七年级学生(依 WISC-III 测得智商 ≥ 120)及其科学教师。从微观层面看,本研究聚焦于针对资优学习者特征而调适的教学互动;在中观层面,学校情境——如实验室的可及性、智慧黑板的使用、协作性的教学文化以及支持性的家长群体——为科学教学提供了充实的环境;在宏观层面,课程框架与政策弹性允许私立学校在遵循国家标准的同时调整教学。

(二) 学科与主题的选择

研究从七年级科学课程“功与运动”单元中选取功/能与简单机械两个物理主题来考察教师的 PCK,因为 PCK 具有主题特异性。这两个主题与该教师的物理学背景相契合,而扎实的学科内容知识(SMK)对 PCK 的发展影响显著。SMK 稳固的教师能更有效地在课堂中运用 PCK[8-9],在物理教育中尤其如此——该领域对内容知识的提升有着关键需求[6]。物理概念往往抽象,会造成独特的学习挑战,要求教师发展出替代性的教学法。因此,可以预期所选教师会展现出充实的教学实践与动态的 PCK 成分互动。由于教师的 PCK 难以测量与评估,且短期观察常常错过其中的复杂之处,本研究采用长期数据收集,以准确捕捉教师 PCK 互动的复杂性与细微之处。为此,这两个主题的教学历时六周(每周三课时),使研究得以更深入地分析教师的 PCK。此外,由于物理领域 PCK 互动的既有研究有限,所选主题也提供了细致考察的良好机会。

(三) 数据收集

本研究只使用课堂观察数据,通过替代性映射法(AMA)考察 PCK 成分之间的互动。之所以选择课堂观察作为主要数据来源,是因为它能真实地反映教学实践中的实施性 PCK。研究共观察了十九节 40 分钟的课,内容为功/能与简单机械两个七年级物理主题。数据收集依据一份与 Magnusson 等[2] PCK 模型相对应的观察方案进行,所有课时均作了录音。

需要说明的是,本研究属于对既有数据的二次分析。初始研究采用综合性质性设计,在 PCK 精炼共识模型(RCM)框架下,通过课堂观察、课前与课后半结构化访谈等多种数据来源考察教师的 PCK。而本研究仅聚焦于课堂观察所捕捉到的 ePCK 教学阶段,以确保在研究范围之内保持分析的深度与清晰度。

在初始研究中,课前访谈考察了教师的教学计划,包括学习目标、教学策略与评价方法;课后访谈则记录了她对课堂实施、学生反应以及计划与实际教学之间偏差的反思。访谈提纲围绕内容表征(CoRe)框架编制,所有访谈均录音并逐字转录。这些访谈虽有助于更全面地理解教师的 PCK,但并非本研究分析的重点。

为确保方法上的严谨，研究者以非参与观察者的身份 不显眼地坐在教室后排。在正式收集数据之前，研究者进行了为期两周的熟悉期，以降低可能的观察者效应。该阶段不收集任何数据，研究者以职前科学教师的身份作自我介绍，以减轻学生的紧张感并促成自然的课堂互动。

（四）数据分析

本研究采用二次数据分析路径。二次数据分析指对此前为某一特定目的而收集并分析过的数据重新加以考察，以回应新的研究问题或发展出替代性视角。该方法允许研究者在不同情境下分析既有数据，从而生成新的知识。本研究即以二次数据分析确立一种新的视角或概念焦点。由于研究是从不同视角重新考察既有数据的一部分，它属于“新视角 / 概念焦点”这一类别。在作者此前开展的研究 中，已对与功和能、简单机械以及摩擦力相关的显性 PCK 作了深入分析，旨在揭示教师面向资优学生教学时所动用的知识与技能。该研究使用的数据包括访谈、课堂观察、卡片分类活动与教案；数据依 Magnusson 等[2] 的 PCK 模型加以分析，所得编码与类属被整理成详细的表格。关于编码过程、普通科学课程与拓展课程内容的差异，以及资优学生的特征等详细信息，可参见作者的初始研究。而在本研究中，仅对课堂观察加以分析，以考察教师的 PCK 成分在教学过程中如何互动；这些观察数据通过内容分析与持续比较法予以检视。

（五）内容分析

本方法用于捕捉功 / 能与简单机械教学过程中 PCK 成分的互动。内容分析有助于发现相关数据中反复出现的词语或编码，把类属归并到特定主题之下，从而使研究者能够从数据集中作出推论。内容分析的第一步是依据文献确定类属。据此，我们首先识别出预设编码与生成性编码以及互动类属，主要取自 Park 和 Chen 与 Aydın 等 的研究。这些类属代表数据集中可能出现的二元互动。不过，我们对部分类属作了调整与精炼，使之契合本研究的情境，并引入新的类属以反映三元、四元或更复杂的互动。最终，我们识别出十个互动类属。表 1 呈现了本研究中代表 PCK 成分互动的编码与类属。

（六）持续比较法

该方法用于一个反复往返的过程之中：数据收集之后以螺旋方式抽象出概念或发展出理论。这种螺旋式推进包含数据与数据、数据与类属、类属与类属、以及类属与概念之间的反复比较。本研究运用持续比较法构建 PCK 图，即以归纳取向把 PCK 成分的互动与类属相比较、并把类属彼此相比较。每一个互动编码都被系统地与源自 Park 和 Chen 与 Aydın 等 互动类属的类属加以比较和对照。后续的 PCK 图也以类似流程构建：把一个主题的图与下一个主题的图相比较和对照。

Table 1 Interaction of the PCK Components' Codes and Their Explanations

表 1 PCK 成分互动的编码及其说明

编码	说明
KoIS-KoA	运用教学策略评估学生的基础知识或概念理解。
KoIS-KoL	通过特定教学方法处理错误概念或前备知识的缺口；运用有针对性的教学技术把抽象观念简化；采用为克服学习挑战而定制的策略。
KoIS-STO	运用所选策略开展与教师教学目标相一致的授课。
KoIS-KoC	通过特定教学策略把拓展课程主题纳入课堂。
KoA-STO	运用评价方法测量学生是否达成了教师预期的目标。
KoC-KoL-KoIS	实施教学策略以应对高阶活动所引发的挑战。
KoL-KoC-KoIS	在高阶活动中，调整教学策略以回应源自资优学习者需求的提问。

KoIS-KoL-KoIS	教师通过某一特定教学策略讲授某一主题时可能出现学习困难；为应对这一困难，教师调整教学策略或补充其他教学技术。
KoIS-KoA-KoL-KoIS	在提问以进行评价时可能产生学习困难；教师通过修改问题或补充讲解加以应对。
KoIS-KoC-KoA-KoL-KoIS-KoL-KoIS	教师运用某一特定教学策略讲解一项拓展活动；在评价该活动的过程中可能出现学习困难；为应对这些挑战，教师提供替代性的例子与讲解；若困难依旧存在，教师最终改用另一种教学技术。

在构建 PCK 成分互动图的过程中，我们对课堂观察作了分析。在识别出与 PCK 成分互动相关的编码与类属之后，遵循如下流程：第一，逐步列出教师教学过程中出现的各项互动，从每节课的开始一直到结束。例如，表 2 呈现了功和能这一主题下“势能”子主题相关互动的先后序列。第二，我们尝试把这些编码（表 2）安置到一张图上。各项互动以结构化方式分组，并以最高效、最经济、最节省空间的方式排布于图中。图 1 展示了该教师讲授势能主题的全部环节。

Table 2 Codes and Explanations of the Potential Energy Interaction Map
表 2 势能互动图的编码及其说明

编码	说明
KoIS-STO	教师以讲授方式呈现其目标与宗旨（讲解势能）。
KoIS-KoL	教师运用某一策略讲解势能与高度的关系，由此引发学生的学习困难。
KoIS-KoA	教师提出问题以评估学生的表现。
KoIS-STO	教师以讲授方式呈现其目标与宗旨（如讲解势能公式）。
KoIS-KoL	教师运用某一策略讲解势能与质量的关系，由此引发学生的学习困难。
KoC-KoL-KoIS	教师呈现高年级概念时出现了学习困难（KoC-KoL），教师设法改变其策略以加以应对。
KoIS-STO	教师以讲授方式呈现其目标与宗旨（如讲解势能公式中的符号与单位）。
KoL-KoC	学生就课程之外的拓展主题提问，促使教师延伸其讲解。

图 1 所示的图由两个同心圆构成，五个 PCK 成分（KoIS、KoL、KoC、KoA 与 STO）置于圆心。两圆之间的环形带被划分为四个不同的教学环节（环节数量因主题而异，其他图中的环节数并不相同），每个环节代表课堂的一个片段，并标示出该环节中发起互动的成分。例如，在环节 1 和环节 3 中，互动由 KoIS 成分发起；在环节 2 中为 KoC；在环节 4 中则为 KoL。

各项互动以箭头呈现，说明教师的知识与技能在教学过程中如何彼此影响。黑色箭头表示二元互动，红色箭头表示三元互动。互动按其在各环节内发生的先后次序编号。例如：

- 教学环节 1 包含五项互动。在该环节中，KoIS 是发起成分，各项互动主要涉及 KoIS 与 STO 或其他成分之间的关系。其中互动 1 与互动 4 表明，教师为达成教学目标（STO）而运用了特定的教学策略（KoIS）。各项二元互动的详细说明见表 2。
- 教学环节 2 只包含一项互动，即互动 6，属于三元互动（KoC-KoL-KoIS）。该互动出现在教师引入高阶概念时察觉学生存在学习困难（KoC-KoL），并据此调整其教学策略之际。
- 教学环节 3 与环节 4 各包含一项互动。环节的划分依据是教学过程中发起成分的更替。这一分类有助

于呈现教学的时间进程，并便于追踪各成分之间的转换。

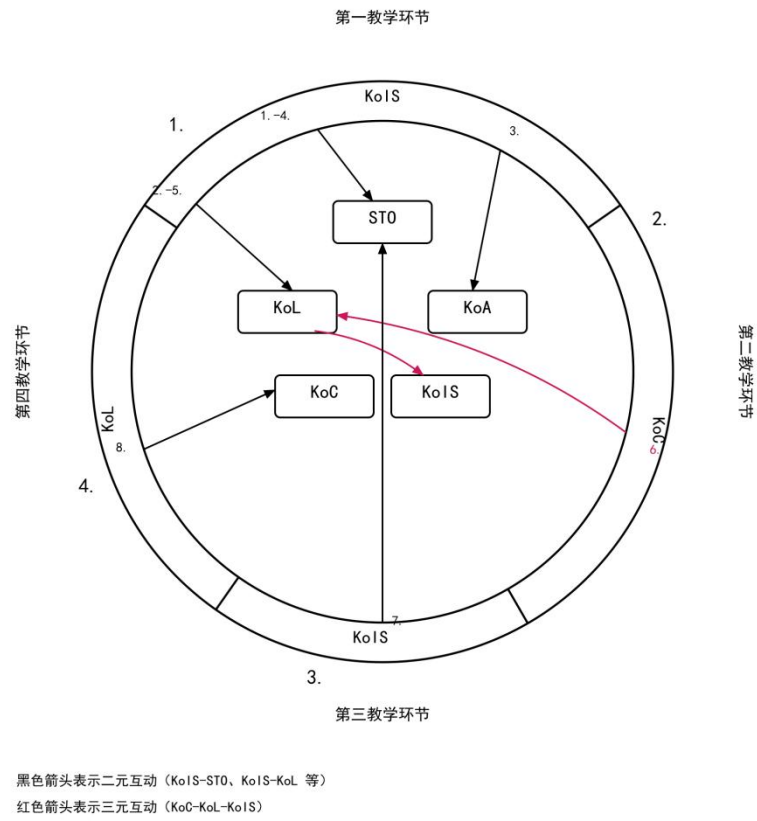


Figure 1 Potential Energy Interaction Map

图 1 势能互动图

最后，我们分析了两个主题，通过对每张图的比较与对照构建出 12 张 PCK 图，其依据是教师关于功和能（功、动能、势能与能量守恒）以及简单机械（简单机械、杠杆、滑轮、起重装置、斜面、轮轴、齿轮与圆箍）的教学。借助持续比较法，我们得以识别出教师教学中的共同模式，聚焦于图中所呈现的 PCK 成分互动。

为确保本研究的可信度，我们采用了三角互证（数据、研究者与方法三方面）、长期观察、同行汇报 与成员检核 等手段。基于观察数据构建 PCK 图时，界定互动编码的评分者间信度达到 79% 的一致率；使用观察方案收集数据的评分者间信度则为 85%。这些数值可视为本研究可信度的充分指标。

三、研究结果

在完成详尽的数据分析之后，我们运用 AMA 构建了 12 张 PCK 图（部分图见附录）。这些图包含成分之间的二元、三元及更复杂的互动，其编码及说明见表 1。基于这些图，本研究得出如下四项主要论断。

（一）替代性映射法（AMA）呈现出更细致、更复杂的互动

起初，我们曾考虑采用 Park 和 Chen 的映射法。在应用其 编码方案并绘制初步的 PCK 图之后，我们发现一些关键的教学要素——例如教师如何应对学习困难——被遗漏了。映射法把我们局限于二元互动（如 KoC-KoL、KoIS-STO）及其频次，只能提供成分使用情况的概览，而无法捕捉教学的细节。为更好地呈现该教师的 PCK，我们需要一种能够逐步刻画其整堂课教学的表征方式。这促使我们发展出本研究所使用的 AMA。图 2 以功和能主题为例，对两种方法作了比较。

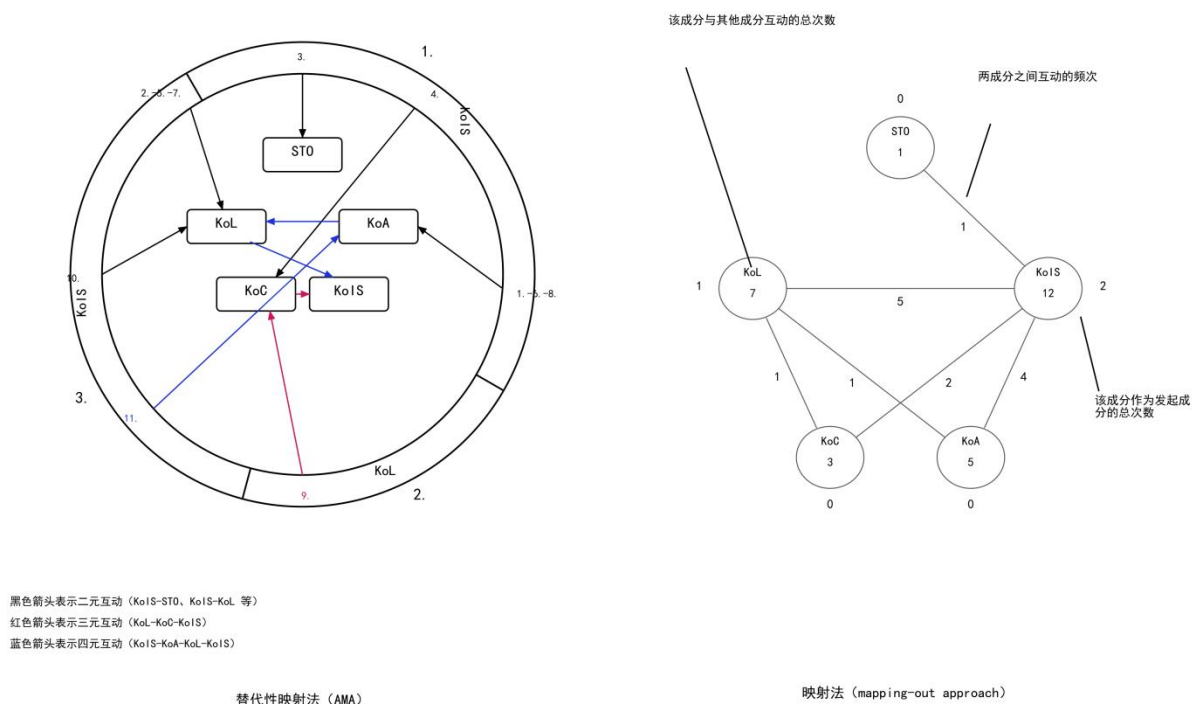


Figure 2 Interaction Maps of Work and Energy

图2 功和能互动图

注：左图为替代性映射法（AMA）所得的互动图，右图为 Park 和 Chen 映射法所得的网络图；节点内的数字为该成分与其他成分互动的总次数，连线上的数字为两成分之间互动的频次，节点外的数字为该成分作为发起成分的总次数。本图已重绘并译为中文。

AMA 使我们能够清晰追踪 PCK 互动的先后次序与复杂程度，从而更好地解读教师的实践。以图 2 为例，教师先以提问评估学生的前备知识（KoIS-KoA），继而处理错误概念（KoIS-KoL），讲解关键概念（KoIS-STO），并引入公式与例题（KoIS-KoC）。这些环节又引发了新的学习困难（KoIS-KoL），促使教师补充讲解并追加提问（KoIS-KoA、KoIS-KoL）。她重新提出同一道题以再次评估学生的理解（KoIS-KoA）；当困惑依然存在时，她转而使用拓展性活动（KoL-KoC-KoIS）。在进一步的澄清尝试之后（KoIS-KoL），她再次调整讲解方式，但学生仍感吃力，由此形成了一个涉及多个成分的最终教学循环（KoIS-KoA-KoL-KoIS）。总之，AMA 使我们得以逐步细致地观察教师的 PCK 在教学过程中如何演变，不仅捕捉到三元、四元乃至更复杂的互动，也捕捉到驱动这些互动的发起成分。

（二）学生的学习结果塑造互动

研究发现，反映在 KoL 之中的学生学习结果对教师的 PCK 有强烈影响。KoL 包含三个子成分：关于学生困难的知识、关于错误概念的知识，以及关于资优学生特征（如拓展需求）的知识。这些子成分以不同方式与其他 PCK 要素互动。KoIS-KoL 的关联显示出教学策略有时会引发学习困难；KoL-KoC 的互动揭示了教师为资优学生调整活动所作的努力；KoA-KoL 则出现在评价过程中——此时学习缺口变得可见。总体而言，这些子成分在整个教学过程中持续影响着教师的教学决策。

图 2（功和能）呈现了两类 KoL 互动。在第 2 项互动中，教师询问“功”的概念，学生错误地回答“功就是人在日常生活中所做的任何事”。此处 KoIS 与 KoL 发生互动，专门处理错误概念。在第 9 项互动中，当学生对讲解不满意时，教师借助拓展内容调整教学——先动用 KoL（资优学生特征），再动用 KoC（课程知识），最后动用 KoIS（呈现数学问题）。在第 11 项互动中，与学习困难相关的 KoL 变得明显：教师评估学生的理

解（KoIS-KoA）；当学生感到吃力时（KoA-KoL），她调整了自己的策略（KoL-KoIS）。

该教师的 12 张 PCK 图在互动数量、类型变化与复杂程度上呈现出显著差异。即便是动能（图 3）与势能（图 1）这样相关联的物理主题，其图也各不相同：图 3 所呈现的互动比图 1 更多、更复杂。学生的学习结果——如理解状况、学习困难或拓展需求——显著影响着教学决策。例如，动能主题包含 12 项互动，其中两项为三元互动；而势能主题包含 8 项互动，其中一项为三元互动。两个主题虽在内容与复杂度上相近，但教学的先后顺序（先教动能）也影响了图的结构。

此外，学生能够把先前关于动能的学习迁移到势能主题，从而减少了教师讲授势能时所面临的教学挑战。一旦动能与势能之间建立起有意义而稳固的联系，学生理解能量守恒主题就变得更为容易。

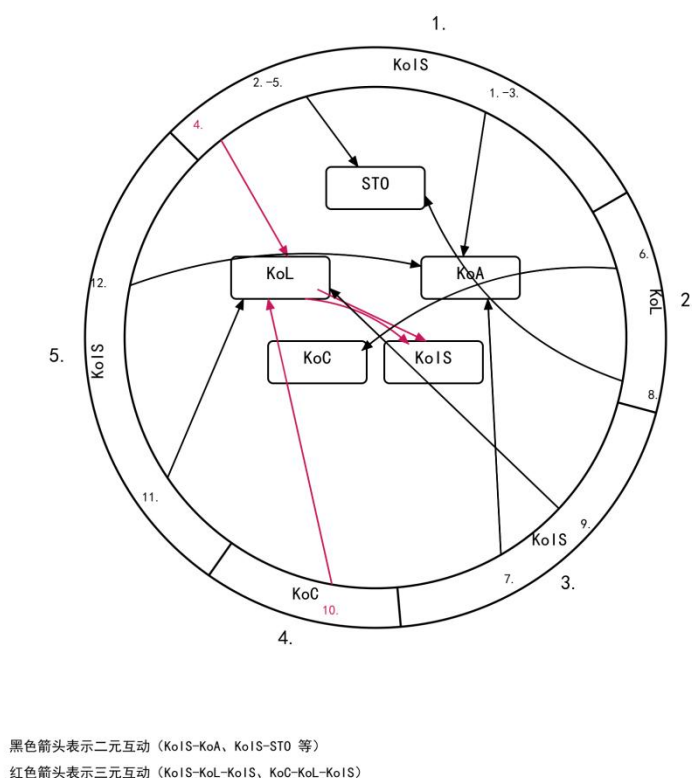


Figure 3 Interaction Map of Kinetic Energy

图 3 动能互动图

这一发现同样体现在简单机械的教学之中。教师依如下顺序讲授各主题：杠杆、滑轮、起重装置、斜面、轮轴、齿轮与圆箍（见附录）。杠杆与滑轮各自涉及十项以上的互动，其余主题则少于五项。学生在杠杆与滑轮上遇到的困难更多，因为这两个主题教得最早，且需要掌握核心概念。一旦他们理解了力与负载之间的关系，便能把这一知识迁移到斜面、齿轮等后续主题，从而使教师面临的教学挑战减少。

（三）互动图解释了教师的教学实践（ePCK 的教学阶段）

由于本研究只关注教师的教学过程，教师的互动成分大多以 KoIS 开端。提问、解释现象、开展讲授或解题，都是教师所运用的、代表主题特定策略的教学应用。在以 KoIS 发起课堂之后，学生的学习结果——如学习困难、不明之处或错误概念——塑造了后续互动的方向、类型与复杂程度。

在分析这些 PCK 图时，KoIS 以两种不同的方式呈现。第一，KoIS 作为发起成分（由两圆之间的环形带表示）与其他成分展开互动，这一模式在所有 PCK 图中都一致地出现。图 4 即是说明 KoIS 作为发起成分之作用的一例。

依图 5，教师以视觉材料和模型讲解圆箍及其特征，由此开始授课（KoIS-STO）；接着，她就圆箍及其连接方式提出问题，以评估学生的理解（KoIS-KoA）；最后，她就圆箍及其旋转形态提问，以评价学生的表现（KoIS-KoA）。在这三项互动中，均由 KoIS 发起与其他成分的互动。

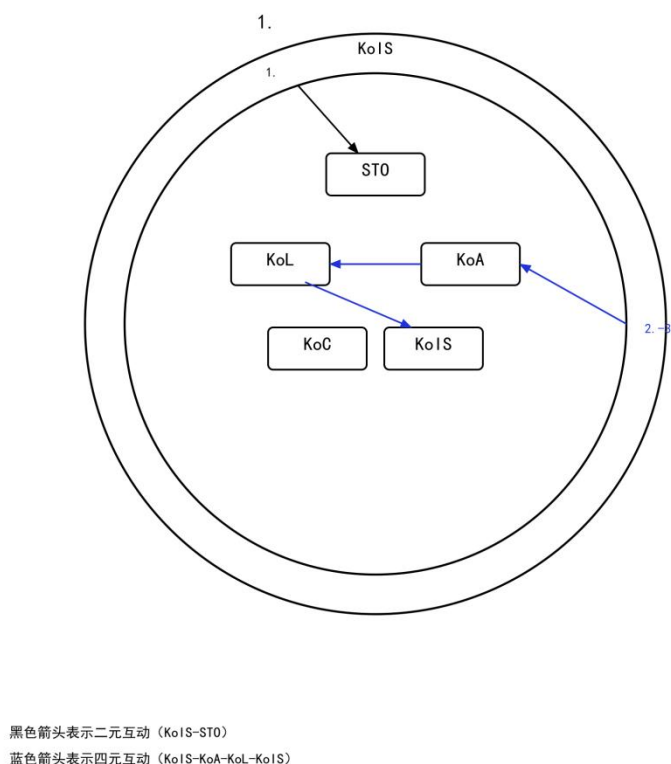


Figure 4 Interaction Map of Hoops

图4 圆筛互动图

第二项观察是，当学习困难出现时，KoIS 也可以作为一般性的互动成分（由图形中央五个成分之一表示）发挥作用。图 5 表明，为回应学习困难，教师通过引入新的问题、例子或其他教学策略来调整自己的教学。在这一过程中，教师动用其 KoIS 以增进或支持学生的理解。例如，图 5 中第 2 项与第 3 项互动（KoIS-KoA-KoL-KoIS）显示，由于学生难以完全理解她的问题与讲解，教师改变了自己的教学策略。

四、讨论

本研究考察了一位科学教师在讲授功 / 能与简单机械时其 PCK 各成分之间的互动。研究提出 Park 和 Chen 映射法的一个修订版本, 称为“替代性映射法”(AMA), 用以更细致地捕捉这些互动。AMA 揭示了哪些成分发生互动、互动的频次如何, 以及学生的学习结果与其他成分如何影响教师的实践。与以往侧重数量的路径不同, AMA 还揭示了这些互动的质量, 从而提供了对 PCK 更为丰富的认识。AMA 不把各成分孤立看待, 而是聚焦于它们之间的动态相互作用, 增进了我们对教师 PCK 的理解。所绘制的图显示出各成分如何在整堂课中互动, 并各自具有明确的方向性流向。与以往常常缺乏方向性的研究(如)不同, AMA 阐明了是哪个成分发起了互动、又是哪个成分作出回应, 从而更清晰地呈现了教学推理的图景。

Gess-Newsome[1] 把 PCK 概念化为静态的（计划与推理）与动态的（教学实践）两个方面。AMA 捕捉的正是实施性 PCK 动态阶段所发生的一切，与 Carlson 和 Daehler 的提炼共识模型 相契合。由此看来，AMA 是分析与追踪 ePCK 领域内课堂实践的一件有用工具。RCM 虽勾勒出 PCK 的关键要素，却未清楚说明教师如

何发展 PCK、如何调整教学,或如何整合各类知识基础,也未明确把学生学习与教师 PCK 联系起来。相形之下,AMA 表明学生的反应通过成分之间的互动,在塑造教师的 PCK 方面发挥着重要作用。

本研究提出四项论断并给出支撑证据,为理解 PCK 提供了新的视角。第一项论断引入了 AMA,表明该教师的 PCK 互动图既具主题特异性、又具概念特异性。PCK 研究往往聚焦于主题层面或概念层面。即便在物理内部,PCK 水平也因主题而异[6]。通过 AMA 生成的每一张图都是独特的,反映出基于概念的互动。这些图在互动频次(3 至 13 项)与复杂程度(二元、三元或更复杂)上各不相同。尽管教师采用的是一以贯之的教学取向,各图仍呈现差异,这支持了如下观点:科学主题——尤其在物理中——在抽象程度与复杂程度上存在差异。这些差异可能源自学科内容知识的不同[6],由此带来各异的学习与教学挑战,并表现为多样而复杂的 PCK 互动。

第二项关键发现关乎学生的学习结果如何塑造教师的 PCK 图。KoL 是仅次于 KoIS 的第二活跃成分。KoL 的三个子成分——对学生困难的觉察、对错误概念的觉察以及对资优学生特征的觉察——构成了显著的教学挑战。处理错误概念需要有意识地整合概念性策略。与此同时,部分物理主题的抽象性与复杂性也造成了学习困难,而这些困难本就是教学实践的固有组成部分。每一项挑战都触发了 KoL 与除 STO 之外所有成分的互动。与之类似,Aydın 和 Boz 发现 KoL 与 KoIS 是教学过程中互动最频繁的两个成分。教师会因应学生而调整自己的教学,例如澄清被误解的概念或改用替代性策略。当学生误用科学术语时,教师往往会提出新的、聚焦于定义的问题。Bayram-Jacobs 等同样强调,识别学生困难并选择恰当的策略是 PCK 发展的核心。在处理前备知识与错误概念时,KoL 与 KoC 频繁互动;Padilla 和 van Driel 研究中半数以上的参与者也呈现出这一关联。

第三项主要发现凸显了 KoIS 在所有互动图中的核心地位。KoIS 作为发起要素贯穿于整个教学过程,涵盖教师的话语、演示、讲解与提问,且往往与主题特定策略相联系。与既往研究类似,KoIS 与 KoL 都相当活跃,并与 KoC、KoA 和 STO 等成分发生互动。Park 和 Chen 也观察到 KoIS 与 KoL 引导着其他成分。Suh 和 Park 报告了 STO、KoL 与 KoIS 之间强有力的三角关联,这一关联占全部互动的 60% 以上,其原因被归结为教师依据自身对学生学习困难的理解来塑造 KoIS。STO-KoIS 与 STO-KoL 之间的强互动,凸显了 STO 对这两个成分的影响。相形之下,Akın 和 Uzuntiryaki-Kondakci 发现 KoC 与 KoIS、KoL 一样居于核心地位。然而 Friedrichsen 等报告的 KoIS 互动较少,这可能是由于他们依赖教案与访谈,未必能充分反映教学实践。本研究以观察为基础的数据则凸显了 KoIS 在实施阶段的突出地位。Aydın 和 Boz 把 PCK 互动划分为理解、决策与实施三个片段,也支持了这一点:在计划阶段占主导的是 KoL、KoC 与 STO,而在教学过程中更活跃的则是 KoIS 与 KoA。总体而言,KoIS-KoL 互动的强度因情境而异。教师教育者往往能识别学生的学习困难,却未必据此调整策略,从而导致较弱的 KoIS-KoL 关联;相反,职前教师倾向于更有效地回应学生需求,由此形成更强的互动。

由 AMA 生成的图显示,KoA 与其他所有成分都存在不同程度的互动,且被教师频繁使用,这凸显了 AMA 在捕捉 PCK 互动方面的长处。相形之下,既往研究多把 KoA 报告为互动最少的成分。Şen 等发现,经验丰富的教师呈现出更多的 KoA 互动,而新手教师则较少,这很可能源于评价知识本身的演进性。Bayram-Jacobs 等也指出 KoA 是发展最不充分的 PCK 领域。其中一个原因可能是教师往往专注于内容传递而忽视评价过程,并且通常把评价与考试和单元结束时的任务联系起来,从而使其在图中的呈现有限。然而,Park 和 Chen 强调了 KoA 在实践中的活跃作用,尤其是它与 KoL 和 KoIS 的紧密联系,这些联系源自教师频繁使用提问、观察表现等非正式评价手段。与之类似,本研究中的教师也通过非正式策略评估学生的理解,从而使 KoA 互动在 AMA 图中相当突出。

第四项关键发现关乎 KoC, 尤其是它在拓展活动中的作用。尽管 KoC 与 KoL、KoIS 和 KoA 都发生互动(但不与 STO 互动), 这些互动仍属有限, 表明 KoC 的活跃程度不及 KoIS 与 KoL。这与 Park 和 Chen 及 Reynolds 和 Park 的既往发现一致——他们同样发现 KoC 是教学过程中互动最少的成分。不过, KoC 在计划阶段的活跃程度更高, 在职前教师中尤其如此, 其与其他成分的互动在该阶段有显著发展。学生相关因素——如错误概念、既往经验、人格特质与认知发展——在教与学的环境中至关重要。因此, 学生的知识状况强烈地塑造着教师的 ePCK。为回应 Park 和 Suh 关于改造映射法以更好反映学生学习结果如何影响教学的呼吁, 本研究把资优学生的特征识别为影响 ePCK 的一项主要情境因素。

五、结论与局限

本研究引入替代性映射法(AMA), 用以呈现一位科学教师的 PCK 成分在教学过程中如何互动。AMA 使我们得以追踪每节物理课自始至终有哪些成分彼此相连。值得注意的是, 它不仅揭示了二元互动的存在, 也揭示了三元、四元乃至更高阶互动等更为复杂的模式。此外, AMA 阐明了这些互动的方向性——指明是哪个成分发起了每一项互动——并捕捉到互动在课堂中展开的时间序列。这些能力使我们对教师实施性 PCK 的解读超越了单纯的互动频次与学生学习结果。归根结底, AMA 为课堂教学中 PCK 成分的结构与流动提供了更全面、更动态的理解。

尽管具备上述长处, 本研究仍有两项主要局限。第一, 依据 Magnusson 等[2]的界定, STO 包含教师的教学目标、对科学教学的一般看法, 以及经 Friedrichsen 和 Dana 拓展后加入的、教师对科学本质(NOS)的理解。本研究中, 该教师虽在教学目标上展现出概念性的把握, 却未强调科学过程技能或科学本质, 因而这后两个子成分在基于 AMA 的 PCK 图中付诸阙如。这一缺失源于本研究依赖课堂观察, 而观察未能捕捉到这些方面。第二项局限关乎 KoC。KoC 被界定为关于物理概念、目标与限制的知识, 但在本研究中是依据涉及进阶概念与材料的拓展活动加以编码的, 因此其原本的范围未能在 AMA 中得到充分反映。针对这些局限, 未来研究可对 AMA 作进一步精炼。作为一件分析工具, 它有望把 RCM 模型抽象的结构变得更为具体和易于理解, 从而推进 PCK 研究。

参考文献

- [1] 王会军. 高校思政课实践教学提质路径. 思想理论教育, 2022(08): 78-83.
- [2] 李艺. 美育融入学科教学实施策略. 中国美术教育, 2020(04): 4-9.
- [3] 褚宏启. 教育公平与教育质量协同发展. 教育理论与实践, 2021, 41(21): 4-8.
- [4] 周光礼. 高校学科建设与科研育人融合. 大学教育科学, 2022(04): 36-44.
- [5] Magnusson S, Krajcik J, Borko H. Nature, sources and development of pedagogical content knowledge for science teaching // Gess-Newsome J, Lederman N G. Examining pedagogical content knowledge: The construct and its implications for science education. Kluwer, 1999: 95-132.
- [6] Shulman L S. Those who understand: Knowledge growth in teaching. Educational Researcher, 1986, 15(2): 4-14.
- [7] Santibáñez D, Vega A, Cofré H, et al. Bibliometric analysis of pedagogical content knowledge: Countries, authors, and fields of knowledge. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 2025, 21(2): em2583.
- [8] 郑金洲. 校本教研提质增效实施策略. 上海教育科研, 2022(08): 5-10.
- [9] 刘昌亚. 义务教育课后服务长效机制. 基础教育, 2021(08): 14-18.

- [10] 丁钢. 传统文化融入现代教育的路径探索. 华东师范大学学报 (教育科学版), 2021, 39(04): 1-10.
- [11] 许晓东. 高校实验室育人功能挖掘. 实验技术与管理, 2023, 38(07): 210-215.
- [12] 沈建华. 劳动教育课程体系开发与实践. 中国教育学刊, 2021(09): 84-88.
- [13] 彭刚. 通识教育课程体系优化建设. 清华大学教育研究, 2023, 42(03): 1-8.
- [14] 孙杰远. 民族地区教育现代化推进策略. 广西师范大学学报 (哲学社会科学版), 2021, 59(03): 108-115.
- [15] 焦建利. 微课赋能课堂教学创新. 中国信息技术教育, 2021(16): 18-22.
- [16] Gess-Newsome J. A model of teacher professional knowledge and skill including PCK: Results of the thinking from the PCK summit // Berry A, Friedrichsen P, Loughran J. Re-examining pedagogical content knowledge in science education. Routledge, 2015: 38-52.
- [17] Wilson C D, Borowski A, van Driel J. Perspectives on the future of PCK research in science education and beyond // Hume A, Cooper R, Borowski A. Repositioning pedagogical content knowledge in teachers' professional knowledge. Springer, 2019: 289-300.