

基于认知负荷理论的医学跨学科研究生课程教学设计

——以“微生物组与代谢组学”为例

杨瑾^{1,2}, 孟盼盼¹, 丁妍^{1,2*}

¹湖北医药学院附属太和医院胚胎干细胞研究湖北省重点实验室, 湖北 十堰

²湖北医药学院附属太和医院心肺及循环性疾病研究所, 湖北 十堰

收稿日期: 2026年6月23日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月28日

摘要

跨学科研究生课程常因多学科知识叠加导致学生认知负荷过重, 影响学习效果。本文以“微生物组与代谢组学”课程为例, 系统引入认知负荷理论, 从内在、外在、相关三类认知负荷的视角分析了跨学科教学中认知超载的生成机制与具体来源。在此基础上, 提出了“序列化内容重构”、“可视化脚手架搭建”、“贯穿案例故事化锚定”、“认知支架式练习”等四类教学设计优化策略, 并阐释了各策略降低认知负荷的理论原理。本文为医学及相关领域的研究生跨学科课程改革提供了可操作的理论指导。

关键词

认知负荷理论, 跨学科课程, 研究生教育, 微生物组, 代谢组学, 教学设计

Instructional Design of an Interdisciplinary Medical Graduate Course Based on Cognitive Load Theory

—A Case Study of “Microbiome and Metabolomics”

Jin Yang^{1,2}, Panpan Meng¹, Yan Ding^{1,2*}

¹Hubei Key Laboratory of Embryonic Stem Cell Research, Taihe Hospital Affiliated to Hubei University of Medicine, Shiyan Hubei

²Institute of Cardiopulmonary and Circulatory Diseases, Taihe Hospital Affiliated to Hubei University of Medicine, Shiyan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 杨瑾, 孟盼盼, 丁妍. 基于认知负荷理论的医学跨学科研究生课程教学设计[J]. 教育进展, 2026, 16(7): 1667-1675. DOI: 10.12677/ae.2026.1671546

Abstract

Interdisciplinary graduate courses often lead to excessive cognitive load on students due to the accumulation of knowledge from multiple disciplines, which negatively affects learning outcomes. Taking the course “Microbiome and Metabolomics” as an example, this paper systematically introduces cognitive load theory and analyzes the mechanisms and specific sources of cognitive overload in interdisciplinary teaching from the perspectives of intrinsic, extraneous, and germane cognitive loads. On this basis, four instructional design optimization strategies are proposed: “sequential content restructuring”, “visual scaffolding construction”, “case-based anchored storytelling”, and “cognitive scaffolded exercises”. The theoretical principles by which each strategy reduces cognitive load are also explained. This paper provides actionable theoretical guidance for the reform of interdisciplinary graduate courses in medicine and related fields.

Keywords

Cognitive Load Theory, Interdisciplinary Courses, Graduate Education, Microbiome, Metabolomics, Instructional Design

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 跨学科研究生教育的兴起与困境

近年来,“新医科”“新工科”这些学科交叉的概念成了高等教育改革的热门话题[1]。在生物医学、肠道微生物组、代谢组学、系统生物学这些前沿领域发展特别快,对研究生的知识整合能力提出了新的挑战。过去,学生常常按照“学科本位”的模式去学习,比如在微生物学系、分析化学系、生物信息学系各自修课程。然而这种方式在面对现在复杂的科学问题时,显得不足[2]。现在,越来越多高校尝试开设跨学科课程,希望打破原有的学科壁垒,让学生学会用多学科思维去分析和解决科学问题[3]。

跨学科课程的教学确实面临不小的挑战,学生常常感到认知负荷过重,甚至有种“信息爆炸”的无力感。不同专业背景的研究生,需要在很短的时间内掌握微生物学、分析化学、生物信息学等多个领域的核心概念、技术原理以及数据分析方法。这些内容远非机械记忆能够解决,很多人会陷入“学不懂、记不住、理不清”的困境。长此以往,不仅课程教学效果会打折扣,学生对跨学科研究的兴趣和热情也会被逐渐消磨[4]。

1.2. 认知负荷理论: 一个被忽视的分析工具

自 1988 年 Sweller 提出认知负荷理论(Cognitive Load Theory, CLT)以来,这一理论成了教学设计领域最具影响力的框架之一[5]。CLT 基于这样一个事实:人的工作记忆容量有限,而长时记忆却没有容量限制。在这个基础上,理论把学习过程中的认知负担分为内在、外在和相关三类,还针对这三类负担提出了一套具体的教学设计原则[6]。

值得注意的是,CLT 与跨学科课程之间存在着天然的适配性。跨学科课程的概念密度高、术语体系

多元、知识交互性强,这些特征决定了其内在负荷原本就偏高。如果教学组织不当,还很容易制造额外的外在学习负荷。与此同时,学生专业背景的多样性使得相同的教学内容对不同学习者产生的“相对内在负荷”差异显著。从这个角度看,跨学科课程为认知负荷理论提供了一个极具典型性的应用场景[5][7]。

然而,认知负荷理论在跨学科教育领域的应用研究仍相对有限。Van Merriënboer 和 Sweller [4]曾在健康专业教育领域提出若干基于 CLT 的设计原则,但其讨论主要针对医学本科教育中的技能训练,对研究生阶段跨学科课程的适用性尚需进一步检验。Oudenampsen 等人[7]探讨了跨学科教育的设计原则,但其关注点更多放在课程结构与组织层面,而非认知层面的加工过程。在国内,王嵩迪[1]指出跨学科课程的知识整合面临“模块化讲授难以形成有机整体”的困境,但尚未从认知负荷的角度提出系统的诊断框架和设计对策。Harmon 等人[8]的综述表明,跨学科教学中的教师反思虽有增加,但关于学生认知过程的理论指导仍显薄弱。

上述文献揭示了一个值得关注的空白:跨学科课程的设计大多仍依赖教师的个人经验和直觉,缺乏对学生认知负荷来源的系统诊断与针对性干预。本研究尝试在这一方向上做一点填补工作,以“微生物组与代谢组学”课程为案例,探索将 CLT 的分析框架系统性地引入研究生跨学科教学设计的具体路径。

1.3. 研究问题与意义

我们以自己开设的“微生物组与代谢组学”研究生课程作案例,尝试探讨以下问题:跨学科课程中学生认知负荷的主要来源有哪些?各种认知负荷到底是在教学过程中怎么出现的?认知负荷理论,能不能用来系统优化课程设计?

2. 认知负荷理论的核心概念与跨学科教学适用性

2.1. 三类认知负荷的界定

认知负荷理论根植于人类认知结构的核心特点。我们的工作记忆,在处理新信息时,容量真的很有有限——通常也就是 7 ± 2 个信息块,超过这个范围就很容易丢失。而长时记忆几乎没有上限,它负责保存那些已经自动化的知识图式。这种认知结构给 Sweller 分析学习过程中的认知负荷提供了基础。他把认知负荷分为三类。

(1) 内在认知负荷

内在负荷,其实说到底,就是学习内容本身有多复杂。这主要看学习材料里,各个元素之间是怎么互相影响的。比如,单纯去记“16S rRNA”这个术语,这事挺简单,负荷很轻。但要理解“16S rRNA 测序如何用于分析肠菌群多样性”时,你就得一下子理清几个关联的概念,脑子里要处理的信息瞬间多了,内在负荷也明显增加。其实,内在负荷受学习目标本质影响最大,教学设计能调整的空间确实有限。不过,老师还是可以通过合理安排顺序、把大任务拆成更小的步骤,帮学生稍微减轻一些负担。

(2) 外在认知负荷

不良教学设计会引发外在负荷,像信息冗余呈现、无关搜索行为频发、组织结构混乱无序,还有语言表达含混不清等状况,皆属此类。此类因素白白耗费了本应用于深度加工的宝贵认知资源,却对学习目标的达成毫无助益。外在负荷,恰是教学设计可直接着手优化的关键所在。

(3) 相关认知负荷

所谓相关负荷,指的是学习者于构建知识图式、整合新学知识以及开展元认知监控过程中,所消耗的那一部分认知资源。它并非无益,恰恰相反,是推动深度学习、助力知识迁移的“有益”负荷。在教学设计领域,一项关键任务便在于营造适宜条件,引导学生把认知资源更多地倾向于、投入到相关负荷之中。

Leppink 等人开发的认知负荷量表为测量这三类负荷提供了有效工具[9]。

2.2. 认知负荷理论与跨学科课程的特殊适配性

跨学科课程与单学科课程相比，在认知负荷方面具有以下特殊挑战(见表 1) [7] [8]:

Table 1. Unique challenges of interdisciplinary and single-discipline courses in terms of cognitive load

表 1. 跨学科课程与单学科课程在认知负荷方面的特殊挑战

维度	单学科课程	跨学科课程
概念数量	较少，术语体系统一	大量，来自不同学科，术语体系差异大
概念交互性	较低，知识呈线性递进	极高，不同学科概念需同时整合
知识图式差异	学生背景相近	学生背景差异大，图式各异
信息呈现一致性	高(同一教师/教材)	低(不同模块由不同教师讲授)

1. 跨学

跨学科课程本身就有内在负荷偏高的特点，加上如果教学设计没跟上，还容易多出不少外在负荷。学生背景不一样，知识储备和能力差得挺多，调用已有图式时花的心思自然也各不相同。所以说，跨学科课程是认知负荷理论一个非常重要的应用场景，也是最合适之一[5] [8]。在这样的课里，老师得用心设计教学策略，想办法帮学生减负，让他们能顺利理解和吸收。学生自己也得学着提升学习能力，慢慢适应这种高强度的环境。

3. 跨学科课程中认知负荷的主要来源分析

“微生物组与代谢组学”是面向生物医学相关专业二年级及以上研究生开设的跨学科选修课程，学时为 32 学时(共 8 周，每周 1 次课，每次 4 学时)。选课学生来自微生物学、临床医学、药学和生物信息学等不同专业方向，专业背景差异较大。课程内容涵盖肠道微生物学基础、代谢组学检测技术、生物信息学数据分析以及功能验证与转化应用四个模块，分别由四位不同学科背景的教师讲授。

在本课程的教学实践中，我们通过以下方式收集信息以诊断认知负荷的来源：(1) 课前发放 Leppink 认知负荷量表问卷，了解学生的基础认知负荷状况；(2) 每次课后进行简短的半结构化访谈，聚焦“这节课哪个部分最难理解”“什么地方让你觉得特别费力”等问题；(3) 课堂观察记录学生在不同教学环节中的表现，包括提问频率、注意力变化和操作完成情况。需要说明的是，这些信息的收集主要用于教学诊断和自我改进，而非严格的实证研究设计。下文的分析基于上述信息来源，以质性描述的方式呈现我们的观察和思考。

3.1. 内在负荷的主要来源

(1) 概念密度高、术语体系跨度大

课程所涵盖的核心概念多达 60 余个，这些概念犹如繁星散落于多个学科领域，微生物学贡献了“Flavonifractor”这类生僻菌名、“16S rRNA”这种分子标记物，以及“操作分类单元(Operational Taxonomic Unit, OTU)”等分类单元术语；分析化学领域则充斥着“液相色谱-串联质谱法(Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry, LC-MS/MS)”这种复杂仪器名称和“多反应监测(Multiple Reaction Monitoring, MRM)”等多反应监测模式；生物信息学抛出“主成分分析”这类统计方法与“通路富集”等系统生物学概念；分子生物学领域更以“I 型干扰素”等信号分子术语增添理解难度。当这些来自不同学科谱系的术语体系在课程中碰撞时，其迥异的术语编码规则与知识表征方式，恰似要求学习者同时掌握多套密码本，显著提升了概念图式重构的认知负荷。

(2) 知识交互性极强

为具体说明跨学科课程中“知识交互性”带来的认知负荷,本文引入“脱氨基酪氨酸(Desaminotyrosine, DAT)”作为贯穿性案例。DAT 是肠道菌群代谢黄酮类化合物产生的小分子代谢物,其发现、检测和功能验证恰好串联了微生物学、代谢组学、生物信息学和分子生物学四个模块的核心知识,是展示跨学科整合教学效果的理想载体。

要深入把握“DAT 抗病毒机制”这一关键案例,得把多个层面的要素串联起来考量,比如得弄清楚是哪些细菌能产生 DAT,这涉及菌群组成;从黄酮到 DAT 的生物转化过程,属于代谢途径范畴;还得关注用 LC-MS/MS 怎样对 DAT 进行定量,这是检测方法层面;以及 I 型干扰素如何被激活,这属于信号通路方面。这些要素相互交织,构建起一个错综复杂的交互网络,内部负荷极大。

(3) 学生背景差异导致相对内在负荷不同

学临床医学的学生可能对 I 型干扰素信号通路挺了解的,可对 LC-MS/MS 原理就不太清楚,而学分析化学的学生刚好反过来,对 LC-MS/MS 原理熟悉,对 I 型干扰素信号通路不太了解。因此,同样的教学内容给不同专业背景的学生带来的“相对内在负荷”差别迥异[10]。

3.2. 外在负荷的主要来源

(1) 模块拼盘式讲授导致的认知断层

课程包含四个模块,且分别由不同学科背景的教师担纲讲授,然而各模块之间却未能形成有效的内在衔接。学生这边刚在微生物学模块构建起菌群的基本概念,转瞬之间,下一周便一头扎进 LC-MS/MS 技术的繁杂细节之中。模块转换之际,既没有过渡环节的巧妙引导,也缺乏整合环节的统筹梳理,这无疑给学生增添了大量“无意义”的外在认知负荷[1]。

(2) 信息呈现方式不当

有些教学 PPT 一页里塞了太多内容,文字、流程图、仪器照片、数学公式全挤在一起,学生得在一堆信息中不停“找重点”,这其实让他们的思维很吃力。再加上专业软件的操作界面也挺复杂,学生分析数据时,既要理解统计概念,又得学会怎么用软件,两件事同时进行,结果互相牵扯,反而影响了理解和操作。

(3) 缺乏认知指引与框架提示

课程开启之初,并未为学生呈上该课程的“整体认知蓝图”,如此一来,学生在学习进程中,犹如置身迷雾,全然不知当下所学的模块在整个知识体系里处于何种位置。这种迷茫状态,让他们产生强烈的“迷失感”,进而不断在那些毫无成效的定位行为里,白白耗费宝贵的认知资源[8]。

3.3. 相关负荷不足的表现

(1) 缺乏整合性任务

在传统教学框架里,学生往往被限定于单一任务模式“聆听讲解、记录要点、解答课后习题”,此类任务多侧重于知识复现层面,鲜少要求学生主动串联不同知识模块,学生因此缺乏深度投入的契机,稳固的跨学科知识图式自然难以构建[3]。

(2) 案例与知识脱节

课程虽以 DAT 为案例展开,可不同模块里案例的呈现方式却大相径庭。在微生物模块,讲的是 Flavonifractor;到了代谢组模块,话题变成了 LC-MS/MS 方法开发;而生信模块呢,用的竟是一个毫不相关的模拟数据集。如此一来,案例根本没能成为贯穿整个课程的“锚点”,学生自然也就难以借助案例搭建起知识整合的心理框架[11]。

4. 基于认知负荷理论的教学设计优化策略

4.1. 序列化内容重构：降低内在负荷

这个策略的底层逻辑不难理解：内在负荷的高低，主要看知识点之间的交互程度。如果把那些相互缠绕的复杂内容拆成几个相对独立的小任务，再按照认知规律排好顺序，学生每个阶段只需要面对有限的信息，就能一步步搭建起局部的知识图式。等这些模块成熟了，再整合到一起，这样瞬间的内在负荷就能降下来[6]。

具体实施时，我们把课程重新设计成“四阶递进”的序列。第一阶段是微生物组基础，核心问题很直接，“DAT 到底是从哪儿来的？”学生要学的知识也限定在几个方面：肠道菌群的构成、Flavonifractor 这个属有什么特点，还有 16S rRNA 测序的基本原理。第二阶段进入代谢组学技术，关注的是“怎么检测 DAT”。内容也比较聚焦，主要涉及 LC-MS/MS 的原理、样品前处理怎么做、定量方法有哪些。第三阶段是数据整合，问的问题是“DAT 和谁有关系？”把前两阶段的数据放在一起做关联分析。第四阶段是功能验证，回答“DAT 有什么用？”开始做一些功能验证和应用探索。

这种按顺序推进的设计，就像搭积木一样，每个阶段的知识交互难度都控制在一个比较舒服的范围里，学生可以在压力不大的情况下，一层一层地把知识学扎实[12]。

4.2. 可视化脚手架搭建：减少外在负荷

这个策略的道理其实挺简单的。学生之所以觉得累，很多时候是因为他们要把大量精力花在“寻路”上，比如翻找信息、理清结构、记住内容在哪，这些事特别耗脑子。如果能把这类认知负担从学生脑子里“外化”出来，比如用可视化的工具直接呈现，他们就能把省下来的精力放到真正理解内容上去了[6]。

具体做法上，我们做了这么几件事：课程一开始，先给学生发一张彩色的知识路径图，图上标清楚四个学习阶段以及它们之间的联系。有了这张图，学生随时都知道自己学到哪了，心里有底，不容易迷路。术语表我们也分阶段做。每进入一个新阶段，就配一份中英文对照的术语表，这样就不会被上一阶段的术语干扰。实验流程尽量做得直观一些。我们把 LC-MS/MS 的前处理过程做成了“一步配一图”的操作手册，同时还录了一个操作视频，学生一看就明白。还有一个挺好用的是云端分析平台。里面已经装好了 R、MetaboAnalyst、QIIME2 这些软件，学生直接登录就能运行代码，不用自己折腾安装和配置，省了很多麻烦。

4.3. 贯穿案例故事化锚定：提升相关负荷

这个策略的核心逻辑是：相关负荷说白了就是学生在主动整合知识时投入的那部分精力。如果用一个“侦探故事”的结构来设计贯穿性案例，通过设置悬念、一步步给出线索，就能把学生推理和预测的本能调动起来。这样一来，知识整合就不再是老师推着走，而是学生自己想知道接下来会发生什么。这种转化，打破了传统教学中知识整合全靠外部驱动的局面。

具体操作上，我们用 DAT 做核心，把课程变成了一个“科学侦探故事”。

第一讲，先抛出一个现象：吃进去的植物成分，怎么通过肠道菌群影响免疫力？接着进入微生物模块，告诉学生这样一个发现：老年人肠道里的 Flavonifractor 变少了，粪便中的 DAT 也跟着下降。这就引出了“年龄 - 菌群 - 代谢物”三者之间的关联。到了代谢组模块，给出 DAT 的化学结构，让学生想一想：这东西该怎么检测？数据整合模块里，直接给出一组 DAT 浓度和 Flavonifractor 丰度的相关性数据，让学生自己“发现”它们之间的关系。最后是功能模块，展示一个关键结果：用了 DAT 的小鼠，感染流感之后肺部损伤明显减轻。这样一来，整个故事的逻辑链条就完整了。

每个模块快结束的时候，老师都会问一句：“根据目前的线索，你觉得 DAT 还可能有什么功能？”用这种方式不断激发学生主动思考，维持他们的相关认知负荷[13]。

4.4. 认知支架式练习：训练整合能力

这个策略的道理也不复杂。一个人从新手变成专家，确实需要系统训练，但一上来就丢给他真实场景里的复杂问题，脑子很容易就直接“宕机”了。认知支架理论提倡用阶梯式的训练框架：先设计一些结构简单、难度较低的任务，让学生在能承受的认知负荷范围内先把方法学会；等他们脑子里有了稳定的知识图式，再慢慢把任务难度加上去，最后才能迁移到解决真正复杂的问题上[5]。这样既能避免一开始就把认知资源耗光，又能通过动态调整难度，让学生始终保持参与感。

具体做法是：先给一份很简单的“玩具数据”，里面只有 5 种菌属、5 种代谢物、10 个样本，让学生自己动手算 Spearman 相关系数，再画个热图。第二周，换成中等规模的数据，要求学生用 R 或 Excel 完成分析。第三周，给一个真实数据的子集，让学生做完整的关联分析，并写一份报告。这种阶梯式练习，学生先在低负荷环境里掌握了方法，然后一步步迁移到更复杂的任务上。

5. 讨论与教学启示

5.1. 认知负荷理论对跨学科教学的系统指导价值

上述实践表明，认知负荷理论为跨学科教学设计的诊断与优化提供了一个逻辑清晰的操作框架。这一框架的基本流程包括：首先诊断三类认知负荷的具体来源，其次针对不同来源设计差异化的干预策略，最后通过教学反馈对策略效果进行评估和迭代。

在“微生物组与代谢组学”课程中，高内在负荷主要来自跨学科概念的高密度和强交互性。解决这一问题的关键在于“分解”而非“压缩”，即通过序列化重构将高度交互的知识拆解为相对独立的认知单元，再按照从基础到应用的认知规律逐步呈现。这一思路与 Sweller 等人[5]提出的“元素交互性管理”原则相一致，但在跨学科情境下的具体操作，例如“如何识别不同学科知识之间的交互节点”、“如何确定合理的拆解粒度”仍需要在实践中摸索。

外在负荷的问题则源于模块衔接不畅和信息呈现方式不当，解决的方向是“外化”，即通过可视化的知识路径图、分阶段术语表和预装分析平台，将学生原本需要在工作记忆中完成的“寻路”工作释放出来。这一点呼应了蔡慧英[6]提出的“可视化脚手架”理念，但本研究的实践提示，可视化工具的设计需要格外注意信息密度的控制，否则可能适得其反。

相关负荷的不足源于整合性任务和连贯性案例的缺失，解决思路是“吸引”，即通过故事化的贯穿案例和阶梯式练习，激发学生主动进行知识整合的动机。与已有研究[11][13]中强调的“案例教学”不同，本研究将案例设计为贯穿始终的“叙事主线”，而非各模块的“举例说明”，这一差别看似细微，但在维持相关认知负荷的持续性方面可能具有实质性意义。

5.2. 实施中的关键权衡与注意事项

(1) 序列化处理与知识真实性之间存在一种张力，序列化虽然便于知识管理，但也容易让知识变得“碎片化”。为了缓解这个问题，需要定期做“整合性复盘”，比如每个阶段结束时，用概念图梳理一下各阶段知识之间的内在联系[1]。

(2) 可视化工具的适切性也很重要，设计不好的图示反而会增加外在负荷，所以应该遵循“极简原则”。

(3) 案例故事的认知负担也需要注意，贯穿性的案例最好保持“单主线、少分支”的结构，别让分支太多把学生绕晕。

(4) 学生差异怎么应对? 可以为基础薄弱的学生提供“差异化材料”, 比如给他们额外准备一些补充阅读包[10]。

5.3. 研究局限与未来方向

本研究还有一些局限。第一, 结论主要基于单一课程的经验, 普适性还需要验证。第二, 研究过程中没有用眼动追踪这类客观测量手段来辅助验证。第三, 不同教学策略的实际效果, 没有单独拆开来看各自贡献多大。基于这些问题, 后续可以把研究拓展到更多类型的跨学科课程中, 看看这个理论框架是不是通用。另外, 也可以试试析因实验设计, 系统比较一下不同策略的效果差异。

6. 结论

跨学科研究生课程常常因为学科知识互相缠绕, 加上学生的工作记忆本来就有限, 很容易出现认知负荷过重的问题。认知负荷理论正好切中要害, 给我们提供了一个清晰的分析和设计框架。以“微生物组与代谢组学”这门课为例, 我们分析了三类认知负荷的来源, 然后尝试了序列化重构内容、搭建可视化脚手架、引入故事化案例、设计认知支架式练习。这些做法下来, 学生确实更容易把不同模块的知识串起来, 理解也更顺畅了。这套基于认知负荷理论的设计思路, 不仅适用于医学领域, 放到其他学科的研究生跨学科课程里, 应该也一样管用。

基金项目

湖北省中枢神经修复与功能重建临床医学研究中心开放课题(2025SJZX007)。

参考文献

- [1] 王嵩迪. 打开跨学科教育的“黑箱”——研究生跨学科课程的知识整合与传递[J]. 研究生教育研究, 2024(6): 35-42+67.
- [2] 高亚梅, 韩毅强, 王艳红. 生物专业学术型研究生跨学科创新能力的培养模式[J]. 科教导刊, 2021(19): 26-28.
- [3] 汪亚琼. 新文科背景下教育学研究生跨学科培养研究——以 H 大学“FN”计划为例[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- [4] Van Merriënboer, J.J.G. and Sweller, J. (2009) Cognitive Load Theory in Health Professional Education: Design Principles and Strategies. *Medical Education*, **44**, 85-93. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2009.03498.x>
- [5] Sweller, J., van Merriënboer, J.J.G. and Paas, F. (2019) Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later. *Educational Psychology Review*, **31**, 261-292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- [6] 蔡慧英. 认知负荷理论视角下指向核心素养发展的教学设计行动框架——基于协作问题解决的学习设计[J]. 教育传播与技术, 2023(4): 10-19.
- [7] Oudenampsen, J., Das, E., Blijlevens, N. and van de Pol, M. (2016) How to Cross the Line: Design Principles for Interdisciplinary Education. *MedEdPublish*, **13**, Article 35. <https://doi.org/10.12688/mep.19693.2>
- [8] Harmon, J., Brown, A., Birbeck, D., Crockett, J., Panadgoo, S., Nawas, A., et al. (2024) Interdisciplinary Reflection by Higher Education Academics Using Teaching Squares: A Scoping Review. *Nurse Education Today*, **142**, Article 106353. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2024.106353>
- [9] Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C.P.M., Van Gog, T. and Van Merriënboer, J.J.G. (2013) Development of an Instrument for Measuring Different Types of Cognitive Load. *Behavior Research Methods*, **45**, 1058-1072. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0334-1>
- [10] Han, J., Liu, G. and Zheng, Q. (2023) Prior Knowledge as a Moderator between Signaling and Learning Performance in Immersive Virtual Reality Laboratories. *Frontiers in Psychology*, **14**, Article 1118174. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1118174>
- [11] 董艳, 李心怡, 丁国胜, 等. 高校跨学科创新人才培养的多元路径研究[J]. 清华大学教育研究, 2024, 45(5): 78-88.
- [12] 吴凡, 汪玲. 基于新版学科专业目录创新医学人才培养机制[J]. 中国卫生资源, 2023, 26(3): 233-238.

-
- [13] Wang, Q., Fang, Z., Xiao, Y., Wang, H., Zhang, P., Lu, W., *et al.* (2023) Lactiplantibacillus Pentoses CCFM1227 Produces Desaminotyrosine to Protect against Influenza Virus H1N1 Infection through the Type I Interferon in Mice. *Nutrients*, **15**, Article 3659. <https://doi.org/10.3390/nu15163659>