Creative Education Studies 创新教育研究, 2026, 14(10), 617-625
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ces
https://doi.org/10.12677/ces.2026.1410827

Hans汉斯

高中生物学微观实验数字化教学路径探析

——虚拟仿真实验在“噬菌体侵染细菌”一课的应用研究

代育瑜，李欣月，肖　荷，邵虹莹，杜鑫月，王朝君*

乐山师范学院生命科学学院，四川　乐山

收稿日期：2026年8月18日；录用日期：2026年10月16日；发布日期：2026年10月29日

摘　要

“噬菌体侵染细菌”实验因微观过程不可见、同位素标记技术抽象、真实实验无法开展等困境，长期面临教学效能偏低的难题。本研究以建构主义、认知负荷及多媒体学习理论为框架，依托虚拟仿真平台，设计“情境导入－虚拟操作－合作探究－讨论论证－归纳迁移”五步教学流程，以假说－演绎法贯穿全程。从学业成绩、科学探究能力和学习兴趣三个维度检验教学效果。结果显示：实验组后测成绩显著优于对照组，理解应用维度效应量最大；科学探究能力均呈显著差异，设计实验维度最为突出；86.3%的实验组学生报告学习兴趣提升。研究表明，合理的虚拟仿真教学设计能有效突破该类“不可见、不可做”实验的教学瓶颈。

关键词

虚拟仿真实验，噬菌体侵染细菌，高中生物学

Analysis of the Digital Teaching Path of High School Biology Micro-Experiments

—Applied Research on Virtual Simulation Experiments in the Lesson of “Bacteriophage Infecting Bacteria”

Yuyu Dai, Xinyue Li, He Xiao, Hongying Shao, Xinyue Du, Zhaojun Wang*

School of Life Sciences, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

Received: August 18, 2026; accepted: October 16, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

The “bacteriophage invasion bacteria” experiment faces the problem of low teaching efficiency for a

*通讯作者。

文章引用: 代育瑜, 李欣月, 肖荷, 邵虹莹, 杜鑫月, 王朝君. 高中生物学微观实验数字化教学路径探析[J]. 创新教育研究, 2026, 14(10): 617-625. DOI: 10.12677/ces.2026.1410827

long time due to the difficulties of microscopic process invisability, isotope labeling technology abstraction, and real experiments cannot be carried out. Based on the framework of constructivism, cognitive load and multimedia learning theory, this study relies on the virtual simulation platform to design a five-step teaching process of "situational introduction - virtual operation - cooperative exploration - discussion and argumentation - inductive migration", and uses hypothesis-deduction throughout the whole process. Test the teaching effect from the three dimensions of academic performance, scientific exploration ability and learning interest. The results showed that the post-test results of the experimental group were significantly better than those of the control group, and the understanding of the application dimension effect was the largest; there was a significant difference in the ability of scientific exploration, and the design experimental dimension was the most prominent; 86.3% of the students in the experimental group reported that their interest in learning had improved. Research shows that reasonable virtual simulation teaching design can effectively break through the teaching bottleneck of this kind of "invisible and impossible" experiments.

Keywords

Virtual Simulation Experiment, Bacteriophage Infecting Bacteria, High School Biology

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

2023 年，教育部等十八部门联合印发《关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》，明确提出“探索利用人工智能、虚拟仿真等技术手段提升实验教学质量”[1]。这一政策信号为虚拟仿真实验进入基础教育课堂提供了制度空间。

高中生物学涉及大量微观层面的分子与细胞活动，实验教学长期面临“想做做不了、想看看不见”的困境。舒桃萍和刘静对成都市 55 所高中的调查显示，87.3%的教师对虚拟仿真实验持积极态度，但实际教学中“经常使用”的比例仅为 11.6%，资源配置失衡和传统教学效能受限是主要制约因素[2]。贾雨竹等进一步指出，课时不足、理论与实验脱节、资源匮乏构成了当前高中生物实验教学的三重困境[3]。

2. 研究背景与思路

2.1. 研究背景

在“噬菌体侵染细菌”一课中，赫尔希和蔡斯于 1952 年通过放射性同位素分别标记 DNA 和蛋白质来追踪二者在侵染过程中的去向，为“DNA 是遗传物质”提供了决定性证据[4]，在科学史上具有里程碑意义。然而在课堂层面，该实验面临四重教学障碍：其一，侵染过程发生在纳米尺度，光学显微镜无法观测；其二，放射性同位素标记技术超出高中生的认知基础，学生难以把握实验设计的内在逻辑；其三，该实验的教学深层目标在于训练假说－演绎思维，对逻辑推理能力要求较高；其四，^{32}P 存在辐射风险，超速离心机等设备远超中学配置标准，实验无法在中学实验室复现。易晓菲的调研数据表明，传统教学模式下学生对该实验设计思路的理解正确率仅为 65%，能够进行迁移应用的比例不足 50% [5]。

2.2. 研究方法与思路

本研究遵循“问题诊断－理论建构－方案设计－实证检验－反思提炼”的技术路线(见图 1)。主要研

究方法包括：

文献研究法——系统梳理国内外虚拟仿真实验教学文献，明确研究起点与理论支撑。

准实验法[3]——选取两个平行班(实验组与对照组：对照组采用常规教学方式，由同一位教师依据人教版教材和 PPT 课件讲授噬菌体侵染细菌实验的原理、步骤与结论，教学时长与实验组相同(均为 1 课时)，不使用任何虚拟仿真平台或模拟软件。)，采用前测－教学干预－后测设计，辅以延迟后测，检验教学方案的实际效果。

问卷调查法——以《学习体验与态度问卷》施测，获取学生对虚拟仿真学习体验的主观反馈。

访谈法——从实验组后测成绩的高、中、低三段各抽取 2 名学生进行半结构化访谈，作为量化数据的质性补充。

Figure 1. Research framework
图 1. 研究思路

3. 理论基础(见图 2)

3.1. 建构主义学习理论

建构主义学习理论认为知识并非被动接收，而是学习者在与环境的积极互动中主动建构的产物[6]。在噬菌体侵染实验教学中，如果学生仅通过教师讲授获知“DNA 进入宿主而蛋白质留在胞外”，则属于被动接收；若学生在虚拟平台上自主选择同位素方案、观察离心结果并判断假设的真伪，则属于主动建构。Jonassen 等指出，技术工具的真正价值在于充当学习者“建构意义的伙伴”，而非“传递信息的管道”[7]。审视当前课堂中的多媒体应用，不难发现许多场景恰恰将技术降格为信息输送管道——知识从 PPT 单向传递至学生，思维过程被省略。

3.2. 认知负荷理论

Sweller 将认知负荷区分为三种类型[8] [9]：内在认知负荷(由学习材料的复杂度决定)、外在认知负荷(由信息呈现方式引入的无关加工负担)和相关认知负荷(有助于图式建构的深层加工)。噬菌体侵染实验的内在负荷较高——学生需同时处理噬菌体、DNA、蛋白质外壳、细菌、同位素、离心管、上清液与沉淀物等多个实体和概念。若信息以碎片化方式呈现，外在负荷将进一步挤占认知资源，导致加工超载。虚拟仿真实验的核心优势在于将分散的微观信息整合为连贯的视觉表征——学生同时看到噬菌体吸附于细菌表面、DNA 被注入、蛋白质外壳滞留胞外——以完整的“认知地图”替代了需要自行拼凑的心智碎片。

由此释放的认知资源可集中投入实验逻辑的深度加工。

3.3. 多媒体学习认知理论

Mayer 提出的十二条多媒体设计原则为虚拟仿真界面的具体设计提供了操作准则[10]：空间邻近原则(相关图文应邻近呈现)、时间邻近原则(视听信息应同步呈现)、双通道原则(视觉与听觉通道联合使用优于单一通道)、冗余原则(避免动画播放时同步呈现大段重复文字)等。在学生进行虚拟操作时教师同步解说(而非操作完成后再进行集中讲授)，即是双通道原则的直接应用。

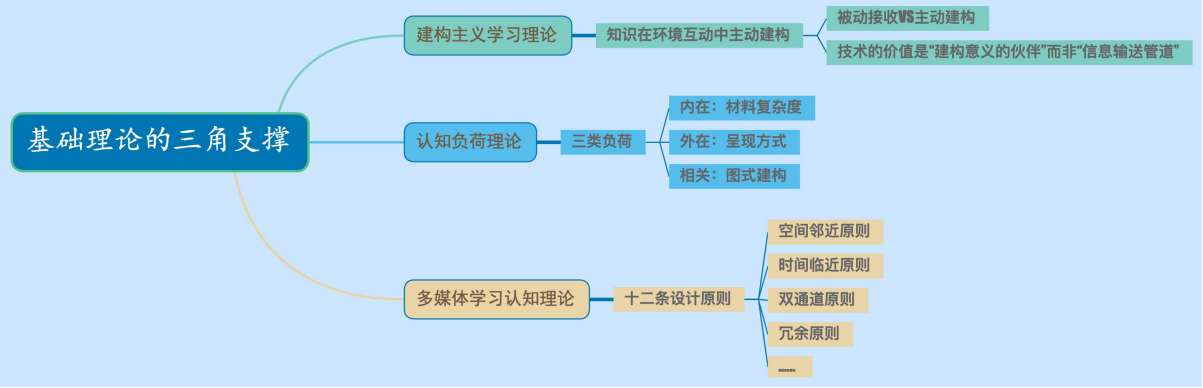

Figure 2. Triangular support of basic theory
图 2. 基础理论的三角支撑

4. 教学难点分析

4.1. 教学内容与课标定位

“噬菌体侵染细菌”实验位于人教版高中生物必修二《遗传与进化》第 3 章第 1 节“DNA 是主要的遗传物质”。该节包含两个核心实验：格里菲斯的肺炎链球菌转化实验提出“转化因子”假说，赫尔希和蔡斯的噬菌体侵染实验以同位素标记法确证 DNA 是遗传物质，二者共同构成“DNA 是遗传物质”的完整证据链[4] [11]。《普通高中生物学课程标准(2017 年版 2020 年修订)》要求学生“概述 DNA 分子是由四种脱氧核苷酸构成的长链，是遗传信息的载体”[12]。在核心素养层面，该实验承载着科学思维(假说－演绎法、变量控制思想)和科学探究(实验设计、结果分析、论证推理)的双重培育功能[13] [14]。然而在教学实践中，该节课往往被简化为知识传授课，其探究本质被遮蔽。

4.2. 教学难点

4.2.1. 微观过程的不可见性

T2 噬菌体全长约 200 nm，侵染过程中尾丝吸附于大肠杆菌表面、将 DNA 注入宿主细胞等关键事件均发生在分子层面，光学显微镜无法观测。传统教学依赖教师口头描述配合教材插图，学生对“DNA 被注入而蛋白质外壳留在胞外”的理解多停留在语词记忆层面，未能形成清晰的心智模型[5] [15]。

4.2.2. 同位素标记技术的抽象性

赫尔希和蔡斯实验的精妙之处在于：利用 ^{32}P 标记 DNA 和 ^{35}S 标记蛋白质，从而区分两种分子的去向[4]。然而，放射性同位素概念超出高一学生的化学认知范围，学生对“为何选择磷和硫、为何不能选用碳或氮、为何不能同时标记同一批噬菌体”等关键决策难以形成深层理解，往往将其简化为考点记忆[16]。

4.2.3. 假说－演绎法的高阶思维要求

该实验的深层教学目标并非让学生记住“DNA 是遗传物质”的结论，而是使其经历完整的假说－演绎思维过程：提出多个待检验的假设→设计能够区分各假设的实验方案→预测不同假设条件下的实验结果→将实际数据与各预测进行比对→排除被证伪的假设[7] [13]。这一思维链对教师的引导能力和学生的思维基础均有较高要求。传统教学常将此过程压缩为“验证性实验”叙事，削弱了其思维训练功能[14]。

4.2.4. 真实实验的不可操作性

^{32}P 具有放射性风险，超速离心机等设备价格昂贵且远超中学实验室配置标准，该实验无法在中学实际开展。由此产生的结果是“黑板上讲实验、PPT 里看实验、试卷上考实验”[2] [3]。缺乏操作体验使学生对实验的理解趋于扁平化——仅知结论，不知证据从何而来、实验设计精巧在何处。

4.3. 虚拟仿真实验的破解优势(见图 3、图 4)

将上述难点与虚拟仿真实验的功能特性进行匹配，可见高度的对应性：

教学难点	传统手段极限	虚拟仿真实验的破解路径
微观不可见	静态图片、口头描述	3D 动态模拟噬菌体吸附、DNA注入全过程的分子动画
技术抽象	板书勾画同位素分子式	可视化区分32P/35S标记部位，交互式对比不同标记的离心结果
高阶思维	教师单向讲授推理逻辑	学生自主选择标记方案、即时获取系统反馈、自我检验假设
实验不可做	无操作体验	拖拽离心管、启动离心机、读取放射性计数——完整交互操作流程

Figure 3. Advantages of virtual simulation experiments
图 3. 虚拟仿真实验的破解优势

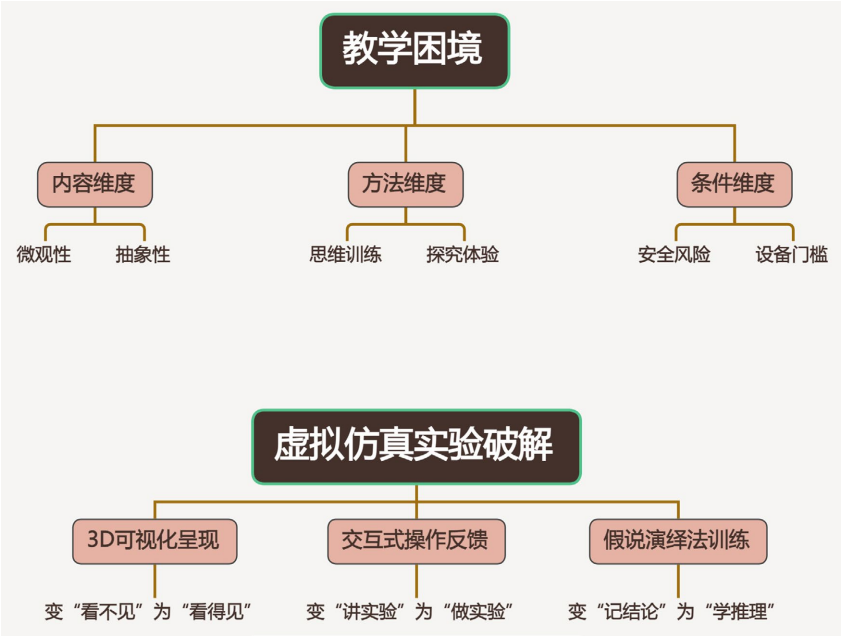

Figure 4. Correspondence between teaching difficulties and virtual simulation solutions
图 4. 教学难点与虚拟仿真的破解逻辑

余映棋和王任翔的 SWOT 分析指出，虚拟仿真实验在“替代因安全、成本、设备原因无法开展的中学实验”方面具有不可替代的价值[17]。何连庆进一步强调，当虚拟仿真用于替代“不可做”的实验时，

其意义不在于“次优选择”，而在于实现从“无”到“有”的质变[18]。噬菌体侵染实验正是这一逻辑的典型案例。当然，也需要清醒认识到虚拟仿真的边界：它替代不了师生面对面的思辨对话，也还原不了真实实验操作中的意外发现。虚拟实验是工具，学生思维过程才是课堂的中心。

5. 基于虚拟仿真实验的教学设计

5.1. 教学目标

生命观念：通过追踪 DNA 和蛋白质在噬菌体侵染过程中的不同去向，深化“结构与功能相适应”的生命观念：DNA 之所以作为遗传物质，与其化学结构赋予的信息储存和复制功能密切关联。

科学思维：完整经历假说－演绎思维过程，基于问题提出多个假设→根据假设设计区分性实验→预测各假设对应的实验结果→在虚拟实验中获取数据→比对预测与实际→排除被证伪的假设，体会“单一实验排除单一可能性”的科学推理逻辑。

科学探究：在虚拟平台完成选择同位素标记方案、设置实验组与对照组、执行搅拌与离心操作、读取并记录放射性计数、分析异常数据(如 ^{32}P 实验组上清液残留放射性)。

社会责任：结合噬菌体疗法在抗生素耐药性危机中的当代进展，建立“科学知识源于严谨探究且服务社会”的意识。

5.2. 教学环节

环节一：同位素标记策略的自主决策。学生进入虚拟平台(见图 5)后，系统不直接给出“正确”的标记方案，而是提供 ^{32}P、^{35}S、^{14}C、^{15}N 等多个选项，要求学生先讨论“DNA 与蛋白质在元素组成上的关键差异”，再自主选择。若学生选择错误(如用 ^{35}S 标记 DNA)，系统提示“该同位素标记的元素在目标分子中含量极低或不存在”，促使其回溯化学知识进行自我修正。这一设计体现了建构主义学习中“学习者主动建构知识”的核心原则——学生不是被动接收“DNA 是遗传物质”的结论，而是通过自主选择同位素方案、遭遇认知冲突、自我修正决策，完成对实验逻辑的主动建构。

环节二：搅拌离心的可视化呈现。虚拟平台以剖面动画展示离心管内物质分层：^{32}P 标记实验中，离心后上清液清亮(含游离噬菌体蛋白质外壳)，沉淀物携带放射性(含被感染细菌中的 DNA)；^{35}S 标记实验中，上清液携带放射性(含游离蛋白质外壳)，沉淀物几乎无放射性。学生通过拖拽离心管、启动离心机、观察分离过程获得近似真实的操作体验。这一设计遵循了多媒体学习理论中的空间邻近原则与双通道原则：学生同时观察离心管剖面动画(视觉)并听取教师同步解说(听觉)，将同位素去向与物理位置变化整合为连贯的心智模型，降低了多实体信息加工带来的外在认知负荷。

环节三：实验数据的读取与记录。学生需在实验记录表中分别填写“我预测的结果”和“实际观察到的结果”，然后进行对照。当预测与数据吻合或偏离时，追问“为什么对(或不对)”——正是这些认知冲突驱动深层学习的发生。“预测－观察－对照”的流程引导学生在数据与假设不匹配时产生认知冲突，这种冲突正是驱动相关认知负荷的核心机制——学生被迫对已有认知结构进行重组，而非简单填入新信息，从而促进深层图式的建构。

环节四：异常数据的思辨讨论。教师展示赫尔希和蔡斯论文中的原始数据表：^{32}P 实验组上清液并非放射性为零，而是含有约 27%的放射性(原因：机械震荡导致少量 DNA 从细菌中泄漏)。在虚拟平台上，将搅拌强度滑块上调，上清液 ^{32}P 比例随之升高，直观呈现了实验操作对结果的影响。异常数据的呈现与思辨讨论直接回应了科学探究中“评价与论证”能力的培养目标。学生面对赫尔希原始数据中的“不完美”结果，需要重新审视实验操作对结论的影响，这体现了建构主义强调的“知识具有暂定性”的认识论立场。

Figure 5. Virtual simulation experiment platform
图 5. 虚拟仿真实验平台

5.3. 教学评价

科学素养测试卷：自编测试卷共 20 题，满分 100 分，包含三个亚量表：基础知识(8 题，40 分，考查噬菌体结构、同位素概念、实验步骤等识记性内容)、理解应用(7 题，35 分，考查同位素选择逻辑、离心结果与物质去向对应关系等深层理解)、迁移探究(5 题，25 分，提供新情境要求学生设计实验方案或分析论证)。

学习体验与态度问卷。编写生物学学习体验与态度问卷，共 15 题，采用李克特 5 点计分。问卷涵盖三个维度：学习兴趣(5 题，如“这节课让我觉得生物实验很有趣”)、参与体验(5 题，如“在虚拟操作过程中我确实感觉自己像在做一个真正的实验”)、平台可用性(5 题，如“虚拟实验平台的操作界面清晰易懂”)。

学生访谈提纲。半结构化访谈从实验组后测成绩高、中、低三段各抽取 2 人。核心问题：“虚拟实验中哪一步让你印象最深刻？为什么？”“虚拟操作与听老师讲 PPT 最大的区别是什么？”“做完虚拟实验后，你对‘科学家怎么知道 DNA 是遗传物质’是否有新的理解？”

6. 结果分析

6.1. 学业成绩差异分析(见图 6)

维度	实验组（n=42）	对照组（n=40）	t	p	Cohen's d
基础知识（40分）	31.24 ± 4.82	27.56 ± 5.13	3.35	0.001	0.74
理解应用（35分）	26.81 ± 4.15	21.93 ± 5.06	4.78	<0.001	1.06
迁移探究（25分）	17.43 ± 3.88	14.15 ± 4.21	3.67	<0.001	0.81
总分（100分）	75.48 ± 10.65	63.64 ± 11.82	4.27	<0.001	0.89

Figure 6. Comparison of post-test scores between experimental and control groups
图 6. 实验组与对照组后测成绩比较

前测结果显示，实验组(M = 52.36, SD = 10.24)与对照组(M = 53.18, SD = 9.87)无显著差异(t = 0.37, p = 0.713)，两组基线可比。

后测结果表明，实验组总分显著高于对照组，效应量达到大效应水平(Cohen's d = 0.89)，且三个亚量表均呈显著差异。

6.2. 科学探究能力差异分析

从四个子维度评价科学探究能力[13]：提出可检验的假说、设计对照实验方案、分析实验数据得出结论、评价与论证实验逻辑。后测迁移探究部分的 4 道开放性试题由两位评分者独立评分。结果显示，实验组在各子维度均显著优于对照组(见图 7)。

子维度（满分）	实验组	对照组	t	p	Cohen's d
提出假说（6分）	4.12 ± 1.24	3.45 ± 1.38	2.32	0.023	0.51
设计实验（7分）	5.05 ± 1.33	3.82 ± 1.56	3.84	<0.001	0.85
分析数据（6分）	4.21 ± 1.28	3.30 ± 1.42	3.05	0.003	0.68
论证推理（6分）	4.05 ± 1.31	3.15 ± 1.47	2.93	0.004	0.65

Figure 7. Comparison of scientific inquiry ability sub-dimensions between experimental and control groups
图 7. 实验组与对照组科学探究能力子维度比较

6.3. 学习兴趣与参与度分析

问卷数据显示，实验组在三个维度上均报告了较高的主观评价水平(见图 8)。

维度	实验组得分	与理论中值（3分）比较
学习兴趣	4.28 ± 0.62	t=13.49,p<0.001
参与体验	4.15 ± 0.71	t=10.52,p<0.001
平台可用性	3.92 ± 0.78	t=7.68,p<0.001

Figure 8. Scores of learning experience questionnaire dimensions in experimental group
图 8. 实验组学习体验问卷各维度得分

6.4. 研究结论

虚拟仿真实验能有效突破该课的教学难点。实验组在学业成绩显著优于对照组，尤其在“理解应用”维度效果最突出。这初步显示虚拟仿真实验的核心价值不在于帮助学生“记住实验步骤”，而在于通过可视化微观过程和可操作化抽象技术，支持学生“理解实验逻辑”。

虚拟仿真实验对科学探究能力的培养存在一定促进效应。实验组在“设计实验”子维度显著优于对照组(d = 0.85)，但在“提出假说”子维度效应量仅为 0.51。这一差异提示了虚拟仿真的功能边界：它在支持“验证假设”方面的效果优于促进“生成假设”，教学设计中可有意识地通过师生互动和小组讨论来补充后者。

综合来看，本研究为虚拟仿真实验在该类教学中的应用提供了初步的实证支持，但其长期效果和推广边界仍需进一步检验。同时，本研究也存在一定局限：样本仅选自两个平行班，推广需谨慎；未进行随机化分班，可能存在选择偏差；虚拟仿真教学可能带来一定的新奇效应，长期效果尚待追踪验证。未来研究可扩大样本、延长实验周期，并结合延迟后测进一步检验教学效果的持续性。

基金项目

1) 乐山师范学院 2026 年大学生创新创业训练计划项目：凉彝协同筑梦——基于 UGS 模式的凉山彝

族中小学生科学素养多维度测评及影响因素研究(项目号 S202610649097)。2) 乐山师范学院 2026 年大学生创新创业训练计划项目：彝韵科学，筑梦少年——依托凉山本土资源的青少年科学素养赋能行动(项目号 2026XJ036)。3) 乐山师范学院 2026 年大学生创新创业训练计划项目：寻迹乡土韵，笃行研学心——地方特色资源赋能 PBL 项目式研学活动的设计与实践(项目号 S202610649163X)。

参考文献

[1] 教育部等十八部门关于加强新时代中小学科学教育工作的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202305/content_6883615.htm, 2023-05-17.

[2] 舒桃萍, 刘静. 虚拟仿真实验在高中生物学教学中的应用现状及启示[J]. 生物学教学, 2025, 50(7): 48-50.

[3] 贾雨竹, 杨一, 邓祎婕, 等. 浅析虚拟仿真实验在中学生物教学中的应用[J]. 科技风, 2025(5): 109-111.

[4] Hershey, A.D. and Chase, M. (1952) Independent Functions of Viral Protein and Nucleic Acid in Growth of Bacteriophage. *Journal of General Physiology*, **36**, 39-56. https://doi.org/10.1085/jgp.36.1.39

[5] 易晓菲. 多元教学策略在高中生物“T2 噬菌体侵染大肠杆菌实验”中的创新应用[EB/OL]. 九江教育, 2026. https://jje.jiujiang.gov.cn/tslm/jyxh/202604/P020260424348511434743.pdf, 2026-10-24.

[6] Vygotsky, L.S. (1978) Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Harvard University Press.

[7] Jonassen, D.H., Peck, K.L. and Wilson, B.G. (1999) Learning with Technology: A Constructivist Perspective. Prentice Hall.

[8] Sweller, J. (1988) Cognitive Load during Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, **12**, 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4

[9] Sweller, J., van Merrienboer, J.J.G. and Paas, F.G.W.C. (1998) Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, **10**, 251-296. https://doi.org/10.1023/a:1022193728205

[10] Mayer, R.E. (2020) Multimedia Learning. 3rd Edition, Cambridge University Press.

[11] 朱正威, 赵占良. 普通高中教科书·生物学·必修 2·遗传与进化[M]. 北京: 人民教育出版社, 2019.

[12] 中华人民共和国教育部. 普通高中生物学课程标准(2017 年版 2020 年修订) [S]. 北京: 人民教育出版社, 2020.

[13] 刘恩山, 曹保义. 普通高中生物学课程标准(2017 年版)解读[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.

[14] 赵占良. 试论中学生物学教材中科学探究的设计[J]. 课程·教材·教法, 2020, 40(7): 101-107.

[15] 孙萌, 胡杰, 李艳红, 等. 互动视频在高中生物学教学中的应用——以“噬菌体侵染细菌的实验”一课为例[J]. 中学生物教学, 2023(6): 58-61.

[16] 张树虎. 以问题为主导, 以探究为主线——“噬菌体侵染细菌的实验”教学设计及说明[J]. 教育研究与评论(中学教育教学), 2014(3): 80-84.

[17] 余映棋, 王任翔. 虚拟仿真中学生物学实验教学平台的 SWOT 分析[J]. 实验教学与仪器, 2024, 41(5): 104-106.

[18] 何连庆. 虚拟仿真实验在高中生物实验中有效应用路径探究[J]. 中小学电教, 2023, 8(1): 84-86.