

人工智能在 STEM 教育中的应用对学习成效的影响——基于 20 项实验和准实验的元分析

The Impact of Artificial Intelligence on Learning Outcomes in STEM Education: a Meta-Analysis Based on 20 Experimental and Quasi-Experimental Studies

薛心语¹, 张诗寒^{2*}

¹ 杭州师范大学经亨颐教育学院

² 湖州师范学院人文学院

* 511202487@qq.com

【摘要】 人工智能与 STEM 教育的融合被认为有巨大教育价值与教育潜力，而人工智能在 STEM 教育中对于学习成效的实践效果仍存在争议。为此，本研究采用元分析法对国内外 20 项实证研究进行整合分析，发现人工智能在 STEM 教育中的应用对学习成效的提升为中等程度，其中对于学习者批判性思维与学习动机的影响较大。调查分析表示，人工智能的促进作用受应用类型、干预时长、学习对象、教学方式的影响而存在差异。基于数据分析结果，本研究提出需转变教师角色，提升 STEM 教育与人工智能的融合程度；以学习者为中心，确立人工智能技术运用的适切范围。

【关键词】 人工智能；STEM 教育；学习成效；元分析

Abstract: The fusion of AI and STEM education is deemed to possess educational potential, yet its empirical impact on learning outcomes is still disputed. To address this, the present study conducts a meta-analysis of 20 empirical investigations from home and abroad. The research found that AI in STEM education has a moderate positive effect on learning outcomes, particularly in enhancing critical thinking and motivation. The effectiveness of AI is influenced by factors such as technical support, intervention duration, learner characteristics, and teaching methods. The study posits that enhancing the integration of STEM education with AI, adopting a learner-centric approach, and defining the scope of AI application are crucial for optimizing its practical utility in STEM instruction.

Keywords: artificial intelligence, STEM education, learning outcomes, Meta-Analysis

1. 研究背景

随着第四次工业革命的浪潮席卷全球，人工智能技术的应用领域不断拓展，教育领域亦不例外。人工智能在教育中的应用（AIEd）作为一个逐渐兴起的研究领域，将人工智能技术与学习科学相结合，改变和促进着教学设计、教学实施过程和教学评估手段，显示出重要的教育价值与教育前景（钟柏昌等，2022）。人工智能与 STEM 教育的结合也具有广阔的教育前景。一方面，人工智能应用于 STEM 教育作为 AIEd 的一个分支，具有一定的教育潜力。STEM 教育强调科学（Science）、技术（Technology）、工程（Engineering）和数学（Mathematics）四门学科的多学科交叉融合（余胜泉等人，2015），是包含着学习者、学习环境、学习媒介等多样教育因素与复杂关系的教育系统。人工智能技术与 STEM 教育系统的融合能够预测学习者的行为和结果，推动自适应学习环境的发展，从而提升 STEM 教育的整体质量。另一方面，人工智能教育与 STEM 教育在教学内容和跨学科属性上具有相似性。首先，两者在课程内容上存在重叠。STEM 教育涵盖的科学、工程与数学的课程内容等人工智能教育所包含的课程内容相近。其次，人工智能跨学科、多领域的特征决定了人工智能教育必须依靠跨学科的交叉融合（梁云真等人，2022）。STEM 教育通过将科学、技术、工程和数学四个学科相互联系，强调多学科课程的整合与联系，也具有鲜明的跨学科属性。在 STEM 教育环境中进

行人工智能教育,提升学习者人工智能素养已成为研究热点之一。

尽管已有研究在一定程度上探索了人工智能赋能 STEM 教育对学生学习成效的影响。然而与 20 世纪 60 年代的人工智能不同,随着人工智能技术在自然语言处理、图像识别、机器翻译等多领域取得了重大突破,尤其是生成式人工智能的出现,其具有大算力、大数据、强算法、强生成和跨模态等特征,人工智能在 STEM 教育中的应用形式也得到了一定的革新与发展。回顾其应用历史,人工智能在 STEM 教育中的应用形式产生了从智能教学系统 (ITS) 向教育智能体发展的多角色教育机器人,出现面向教学全过程与多场景的智慧化学习环境,以及能够处理多模态教育数据的人工智能,呈现出更为智能化、多模态、全面化与集成化的趋势 (胡小勇等人, 2024)。因此虽然之前的研究在一定程度上探索了人工智能赋能 STEM 教育对学生学习成效的影响,但是随着人工智能技术的飞速发展,特别是近年来生成式人工智能的出现,探讨“人工智能赋能 STEM 教学对学习成效产生什么影响?”这一研究问题仍有一定的价值。一方面,近年来人工智能赋能 STEM 教育应用效果仍存在争议。另一方面人工智能赋能 STEM 教育的应用方式也出现一定的改变,现有研究缺乏对人工智能的技术功能、学段差异、教学模式和学习方式等调节变量的分析。基于以上研究背景与研究现状,本研究采用元分析的研究方法,系统梳理自 2015 年至 2024 年过去十年之间,国内外关于人工智能应用于 STEM 教育的教育实证研究,按照元分析方法的规范要求对这些文献进行筛选、梳理和分析,以期进一步探明在 STEM 教育中应用人工智能对学习成效的影响,为人工智能应用于 STEM 教育的设计与教学实践提供建议。

2. 研究设计

2.1. 文献检索

基于 PRISMA 流程图的规范,文献检索分为以下两个步骤进行开展。首先,为尽可能全面地搜集关于人工智能应用于 STEM 教育中的文献,本研究聚焦于中国知网和 Web of Science 两大国内外知名的学术资源数据库中进行搜索。为了保证能搜索到符合本研究问题的文献,本研究将关键词分为三组,第一组包含与人工智能相关的关键词,包含 artificial intelligence、AI、AIED、AIGC、人工智能、生成式 AI 等。第二组是与 STEM 相关的关键词,包含 STEM、STEAM、science、technology、engineering 和 math。第三组是与教育教学相关的关键词包含 education、learning、course、学习、教育和课程。检索时间确定于 2015 年至 2024 年近十年间的文献,最终获得 2670 篇文献。

其次,对于已经搜集到的文献需要按照一定的标准进行筛选,以保证所采纳的文献可以进行元分析。本研究按照以下标准对搜索文献进行筛选:其一,文献的主题为应用人工智能于 STEM 教育。其二,文献必须运用实验法或者准实验法的实证研究,单组实验需要设置实验前后测试,双组实验必须包含一个干预的实验组与之对应的对照组。其三,文献需报告计算效应量所必需的信息,包括平均值、标准差和样本数。依据以上流程,两位研究者进行筛选复核,最终得到 20 篇纳入分析的文献,筛选过程如图 1 所示。

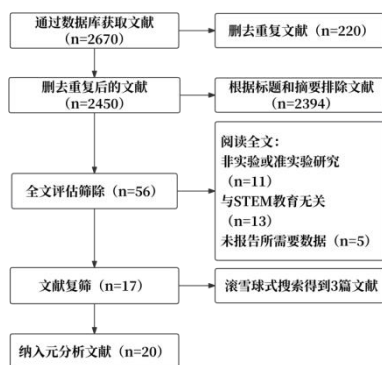


图 1 文献筛选过程

2.2.文献编码

基于对于已有研究的信息提取与总结，本研究共汇总了基本信息、调节变量与实验数据。基本信息包括编号、研究题目、研究者与发表时间，调节变量分为人工智能的应用类型、干预时长、学习对象、学习方式和教学方式五个纬度（见表 1），人工智能的应用类型纬度包含自动评估、预测分析、智能辅导和学习材料。学习成效纬度包括参与度、合作能力、计算思维、发散思维、批判性思维、情感态度、认知负荷、学习策略、学习动机、知识水平和自我效能感。本研究的自变量为应用人工智能技术的 STEM 教育和传统 STEM 教育，应变量为学习成效。两位研究者独立对研究信息进行编码，编码结果的一致性达 89%，整体的编码一致性可接受。对于不一致的文献和编码，研究者之间通过讨论最终达成统一。

表 1 文献编码表

维度	编码题项
基本信息	编号、标题、作者、关键词、发表时间
	干预时长 0~1 周，2~6 周，7~12 周，12 周以上
	学习对象 小学生，中学生，大学生
调节变量	应用类型 智能辅导，自动评估，学习材料（人工智能知识作为 STEM 教育的学习材料），分析预测（对于学生的学习行为或学习结果进行预测）
	学习方式 个人、小组
	教学方式 讲授法、实践法
学习成效	参与度、合作能力、计算思维、发散思维、批判性思维、情感态度、认知负荷、学习策略、学习动机、知识水平、自我效能感
数据信息	样本量、平均值、标准差

2.3.数据分析

2.3.1.效应量计算 对比其他相关类似主题的教育学元分析文献，考虑各个研究之间的样本均值差异过大，本研究使用标准化平均差（Std. Mean Difference, SMD）作为合并效应量来评估人工智能在 STEM 教育中对学习者学习效果的影响，共纳入 55 个可用于元分析的效应量。

2.3.2.发表偏倚分析与异质分析 首先，失安全系数 Egger 线性回归和 Begg 秩相关检验对于本研究所纳入的数据进行发表偏倚检测，以确保分析结果的全面性、准确性与真实性。失安全系数检验标准为 Nfs 值需大于“5N+10”，则未发表的研究对于本研究没有影响(Cohen, 1960)。通过计算得到，本研究的失安全系数为 1947，远远大于 110。也就是说，这需要 1947 份未发表且不显著的研究才能改变元分析结果的显著性。除此以外，本研究采用 Egger 线性回归和 Begg 秩相关检验对于发表偏倚进行检测确认。通过 Egger 线性回归计算得到 t=3.24，p=0.022>0.05（Egger et al., 1997），Begg 秩相关检验得出 p=0.264>0.05。基于以上发表偏倚分析可以得出，本研究存在发表偏倚的可能性较小，元分析纳入样本可以支撑后续分析。

其次，由于所纳入元分析研究样本的测量工具、测量结果、实验设计等各个纬度存在一定的差异性，为提高分析结果的科学性，本研究采用 Q 统计量与 I² 值分析研究的异质性。Q 统计量的分析结果为 471.04，I² 值为 88.53%（处于 75%~100%之间）（Borenstein et al., 2021）。本研究的数据证明样本间存在显著的异质性，可以使用随机效应模型来计算总体效应量。

3. 研究结果与分析

3.1. 整合效应分析

首先, 本研究采用 CMA 3.0 软件计算人工智能赋能 STEM 教育对于学习成效的整体影响。研究的合并效应量为 0.577, 95%置信区间为 0.429-0.725, $p < 0.001$ 。以上数据表明, 传统的 STEM 教育与运用人工智能技术进行的 STEM 教育之间对于学习成效的影响具有显著差异。依据科恩的元分析效应值评估标准, 即效应值小于 0.2 表明影响较小, 效应值处于 0.2~0.8 之间具有中等影响, 效应值大于 0.8 具有较大影响 (Higgins, 2003)。相较于传统的 STEM 教育, STEM 教育中应用 STEM 教育对于学习成效有中等程度的促进作用。

表 2 整合效应量

模型	效应值 数量	效应值 (SMD)	95%置信区间		Z	p
			下限	上限		
随机效应模型	55	0.577	0.429	0.725	7.659	0.000

其次, 根据 CMA 3.0 软件的计算, 对于学习效果的具体影响如表 3 所示。其中大部分实验与准实验研究报告了大于 1 个的效应值, 共对 55 个效应值进行计算。首先, 由数据分析得知, 人工智能运用于 STEM 教育对于学生批判性思维的影响最大, 效应量高达 0.868 ($p < 0.001$)。依据科恩的元分析效应值评估标准, 效应量大于 0.8 可知人工智能运用于 STEM 教育对于批判性思维发展具有较大程度的促进作用。其次, 人工智能运用于 STEM 教育较大程度上促进了学生对于 STEM 相关学科的学习动机 ($SMD=0.753$, $p < 0.001$), 具有平均水平之上的效应量。再次, 人工智能运用于 STEM 教育对于参与度水平 ($SMD=0.576$, $p < 0.001$)、自我效能感 ($SMD=0.551$, $p < 0.001$)、计算思维 ($SMD=0.495$, $p < 0.001$)、合作能力 ($SMD=0.426$, $p < 0.01$)、情感态度 ($SMD=0.318$, $p < 0.001$) 和知识水平 ($SMD=0.302$, $p < 0.001$) 具有中等程度的促进作用。而人工智能对于认知负荷 ($SMD=0.286$, $p < 0.01$) 具有中等偏低的促进作用。但是对于发散思维 ($SMD=0.235$, $p > 0.05$) 以及学习策略 ($SMD=-0.043$, $p > 0.05$) 不存在显著的促进作用, 表明人工智能对于改善学习者学习策略和促进发散思维发展的效果并不充分。

表 3 人工智能对学习成效的具体影响

维度	效应数	效应值 (SMD)	95%置信区间		双尾检验	
			下限	上限	Z	p
批判性思维	2	0.868	0.637	1.100	7.343	0.000
学习动机	2	0.753	-0.481	0.396	7.049	0.000
参与度水平	3	0.576	0.279	0.873	3.806	0.000
自我效能感	4	0.551	0.231	0.739	5.761	0.000
计算思维	5	0.495	0.395	0.595	9.721	0.000
合作能力	5	0.426	0.155	0.696	3.081	0.002
情感态度	2	0.318	0.150	0.482	3.732	0.000
知识水平	23	0.302	0.231	0.373	8.374	0.000
认知负荷	1	0.286	0.106	0.465	3.210	0.002
发散思维	1	0.235	-0.018	0.489	1.817	0.069
学习策略	2	-0.043	0.544	0.962	-0.191	0.848

3.2. 调节效应分析

为探讨在 STEM 教育运用人工智能技术的有效路径, 本研究依据人工智能的应用类型、干预时长、学习方式、教学方式、学习对象等调节表量对于运用人工智能的 STEM 教育的学习成效展开亚组分析 (见表 4)。

人工智能的不同应用类型对于 STEM 教育的学习成效均产生积极的影响。而组间异质性结果表明, 人工智能在 STEM 教育环境中所承担的不同功能对于学习成效影响具有一定的差异 ($Q_b=60.71$, $df=3$, $p<0.001$)。具体而言, 人工智能技术运用于教学的不同方面其对于学习成效的影响不同, 效应值从大到小分别为智能辅导 ($SMD=0.762$, $p<0.001$)、自动评估 ($SMD=0.762$, $p<0.05$)、学习材料 ($SMD=0.762$, $p<0.001$) 与分析预测 ($SMD=0.762$, $p<0.01$)。也就是说在人工智能技术作为智能辅导是提升学习成效最理想的工具。

干预时间的长短对于学习成效会产生显著的促进作用, 组间差异显著 ($Q_b=165.279$, $df=3$, $p<0.001$)。其中干预时长为 0~1 周的教学实践对于学习成效的积极影响最为显著 ($SMD=1.213$, $p<0.001$)。随着干预时间的增加, 学习成效显示先下降后上升的趋势。

学习方式的调节对于学习成效有积极的作用, 但是组间差异并不显著 ($Q_b=0.144$, $df=3$, $p>0.05$)。其中以小组合作作为学习方式的教学实践, 其效应值 $SMD=0.414$ ($p<0.001$), 以个人单独学习作为学习方式的效应值为 $SMD=0.396$ ($p<0.001$)。由此可见, 相比较于单独学习, 在 STEM 教育中人工智能运用于小组合作学习应具有更为积极的调剂效果。

利用不同教学方式进行 STEM 教育的结果显示, 组间存在较为显著的差异 $Q_b=25.785$, $df=1$, $p<0.001$)。以讲授法为主的教学实践 ($SMD=0.535$, $p<0.001$) 与以实践法 ($SMD=0.602$, $p<0.001$) 为主的教学实践均对于基于人工智能的 STEM 教育学习成效有较为显著的积极影响。而其中以实践操作为主要的教学方式对于学习成效能产生更为积极的影响。

学习对象的学习阶段对于 STEM 教育的学习成效具有显著的促进作用且组间差异显著 ($Q_b=48.535$, $df=2$, $p<0.001$)。具体来说, 人工智能技术运用于小学 STEM 教育所产生的对于学习成效的影响最为显著 ($SMD=0.567$, $p<0.001$), 其次为中学 ($SMD=0.520$, $p<0.001$)。随着年龄阶段的增加, 其积极影响呈现下降的趋势, 对于大学生学习成效的积极影响较小 ($SMD=0.203$, $p<0.001$)。

表 4 调节效应分析结果

调节变量	效应数	效应值 (SMD)	95%置信区间		双尾检验		组间效应		
			下限	上限	Z	p	Q _b	df	p
干预时长							165.279	3	0.000
0~1 周	4	1.213	1.184	1.609	12.860	0.000			
2~6 周	3	0.236	0.163	0.308	6.381	0.000			
7~12 周	3	0.128	0.041	0.235	2.789	0.005			
12 周以上	10	0.608	0.549	0.703	15.961	0.000			
应用类型							60.71	3	0.000
分析预测	5	0.136	0.043	0.228	2.875	0.004			
学习材料	2	0.427	0.370	0.484	14.663	0.000			
智能辅导	9	0.762	0.636	0.899	11.840	0.000			
自动评估	4	0.698	0.060	1.337	2.144	0.032			
教学方式							25.785	1	0.000
讲授	12	0.535	0.297	0.772	7.495	0.000			
实践	8	0.602	0.412	0.792	16.522	0.000			

学习方式							0.144	1	0.704
个体	12	0.396	0.339	0.452	13.736	0.000			
群体	8	0.414	0.338	0.289	10.716	0.000			
学习对象							48.535	2	0.000
小学生	4	0.567	0.444	0.690	9.037	0.000			
中学生	9	0.520	0.454	0.586	15.491	0.000			
大学生	6	0.203	0.130	0.275	5.499	0.000			

4. 研究结论

本研究使用 CMA3.0 元分析软件，通过对于近十年来 20 篇将人工智能运用于 STEM 教育的准实验和实验研究进行元分析，探究人工智能运用于 STEM 教育对于学习成效的影响同时从应用类型、干预时长、教学方式、学习方式和学习对象五个维度的调节差异进行分析，提炼人工智能运用于 STEM 教育的较优实践路径。通过对结果的分析，本研究得出以下研究结论：

4.1. 人工智能赋能 STEM 教育对学习成效的影响

总体而言，人工智能赋能 STEM 教育对学习成效有中等程度的正向促进作用，总体效应值为 0.577。具体来看，其主要在学生认知发展、动机与情感发展以及学习行为三方面发挥作用。在认知发展方面，人工智能技术对学生批判性思维和计算思维等高阶思维的发展影响较为显著，效应值较高。其研究结果与沈子生（沈子生和翁子凌，2023）、林佳菊（Lin et al., 2024）、戚佳（戚佳等人，2024）等人的研究结论相符。此外，人工智能赋能 STEM 教育在提升学生知识水平和降低认知负荷方面有一定积极作用。从动机与情感维度看，人工智能技术提升了学生对 STEM 教育相关科目的学习动机、自我效能感以及对 STEM 教育的积极情感态度，此结果与黄晓冬（Huang & Qiao, 2024），岳彦龙（Yue et al., 2022）等人的研究结果相符。关于学习行为，人工智能技术主要对于学习者的课堂参与度与合作能力有积极的影响。

4.2. 人工智能赋能 STEM 教育应用实践路径分析

通过亚组分析研究影响整体效应异质性差异的调节变量。其中干预时长、应用类型、教学方式、学习方式和学习对象对于人工智能运用与 STEM 教育的学习成效具有调节作用。

从干预时长而言，组间差异显著，干预时间为 0~1 周的效应值最高，随着干预时间的变长，效应值呈现先下降后上升的趋势，这一结论与已有研究结论相一致（和文斌等人，2024）。其原因可能在于在干预初期，人工智能的新颖性和即时反馈能够激发学习者参与课程的积极性和学习动机，但随着参与次数的增加，这种新颖效应会逐渐减弱。

从应用类型出发，人工智能作为不同的教学辅助功能运用于 STEM 教育环境都会对于学习成效产生显著的积极影响。通过亚组分析得出，人工智能技术作为智能导学助手，即通过对于学生的学习行为和学习表现进行实时分析，个性化地提供学习材料与学习指导，对于学习成效的促进效果最为明显。其原因可能在于相比较于其他单一的应用形式，智能辅导中集成了自动评估、分析预测以及学习材料的个性化支持等多个功能，参与了课程生成、实践与评价的整个过程，为学习者提供了相对个性化的学习环境。

教学方式来说，讲授法与实践法都对于学习成效产生了积极影响，组间差异显著。而相比较于讲授法，教师让学生在实践学习中学习对于学习成效影响更为显著。其也符合具身教育理念，学生不仅是头脑参与课堂，身体通过实践与环境进行互动，而使身体也加入学习与思考之中，从而获得更为理想的教学效果。

就学习方式而言，组间差异不显著，相比较于个体单独学习，小组合作的学习方式可以产生更为积极的学习成效。其可能的原因在于知识生成中，个人与人工智能之间进行交互，其交互频率、问题质量、批判性思考的意识都弱于小组合作。此外，以小组合作的学习方式中，

学习者不仅可以进行人机交互与协同也可以与组内的人类成员进行交互,从而填补了人机协同中可能带来的情感淡漠,获得更为丰满、健康的学习体验(Fauzi et al., 2023)。

就学习对象而言,人工智能技术运用于各个教学阶段都对于学习成效产生了显著的积极影响,组间差异明显。中小学 STEM 教育是应用人工智能的理想应用场景。相比于大学的 STEM 教育,中小学的 STEM 教育的学习内容的复杂度相对较低,其学习行为与学习表现更容易被检测与识别,因此人工智能技术可以更有效地帮助学习者管理和控制认知负荷。

5. 思考与建议

基于以上的元分析结果,人工智能应用于 STEM 教育对于学习者的各方面发展具有积极的促进作用,但是其促进作用收到教学实践过程中的诸多外在因素的影响,因此本研究提出以下建议。

5.1. 转变教师角色,提升人工智能与 STEM 教学实践的融合性

人工智能的出现影响了教师在 STEM 教育中的角色。人工智能有望将 STEM 教育转换为针对学习者个人特点的个性化学习模式,然而现阶段 AI+STEM 的教育教学实践多以教师为中心的讲授法进行,而以学生为中心的项目化学习、游戏化学习等教学方法出现的频率较低(Xu et al., 2022)。教师作为教学过程的重要角色之一,需要改变自身的教育角色,改革现有教学生成与实践环节,将人工智能技术应用于教学设计、教学实践、教学评估的多个阶段。如在教学设计阶段,教师利用分析预测学生学习结果的人工智能模型预测现有教学设计的教学成效,从而对教学设计进行修改。在教学实践阶段,人工智能在实践过程中实时分析学生的学习表现与学习行为,针对性地提供学习材料。通过推动人工智能与 STEM 教育实践相融合,实现“师—生—机”三元智能化连接,进而满足学习者个性化学习服务的需求。

5.2. 以学习者为中心,确立人工智能技术的適切应用范围

尽管人工智能运用于 STEM 教育对于学习成效有一定的积极作用,但是通过元分析发现其积极作用受到学习者自身特点的影响。如人工智能应用于中小学 STEM 课堂,其对于学习成效的积极影响大于大学阶段。因此将人工智能技术运用于 STEM 教学实践需要考虑学习者的自身特质,在教学设计前对于学习者的年龄阶段、认知发展阶段、学习兴趣等各个因素进行了解,以确保人工智能技术在教学过程中能够满足学习者的实际需求,并且适配于学习者的学习过程特点。除此之外,需要建立相应的监管机制,严格控制人工智能对于学习者个人相关数据的访问权限,确保关于学习者的数据隐私得到保护。

参考文献

- 沈书生和翁子凌.(2023).人工智能课程中促进计算思维培养的场景设计研究.远程教育杂志(06),94-103.
- 和文斌、赵帅、阿不来提·瓦依提、塔卫刚和徐恩伟.(2024).基于生成式人工智能的人机协同学习更能提升学习成效?——基于 20 项实验和准实验的元分析.开放教育研究(05),101-111.
- 岳彦龙、张学军和梁屿藩.(2022).人工智能教学如何培养高中生的计算思维?——基于人工智能案例驱动的 Python 编程教学的实证研究.基础教育(01),74-84.
- 胡小勇、林梓柔和刘晓红.(2024).人工智能融入教育:全球态势与中国路向.电化教育研究(12),13-22.
- 钟柏昌和刘晓凡.(2022).人工智能教育教什么和如何教——兼论相关概念的关系与区别.中国教育科学(中英文)(03),22-40.
- 梁云真、刘瑞星和高思圆.(2022).中小学“人工智能+X”跨学科融合教学:理论框架与实践策略.电化教育研究(10),94-101.
- 戚佳、徐艳茹、刘继安和薛凯.(2024).生成式人工智能工具使用对高校学生批判性思维与自主学习能力的影 响.电化教育研究(12),67-74.

- Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P, et al. (2021). *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons.
- Cohen J.(1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*(1),37-46.
- Egger M, Smith G D & Phillips.(1977). Meta-analysis: Principles and procedures. *BMJ* (712 1),1533-1537.
- Fauzi F., Tuhuteru.L., Sampe.F., et al.(2023). Analysing the role of ChatGPT in improving student productivity in higher education. *Journal on Education*(5), 14886-14891.
- Higgins J P T.(2003). Measuring inconsistency in meta-analyses *BMJ* (7414), 557-560.
- Huang, X., & Qiao, C.(2024). Enhancing Computational Thinking Skills Through Artificial Intelligence Education at a STEAM High School. *Science & Education*, 33(2), 383 – 403.
- Lin, C.-J., Lee, H.-Y., Wang, W.-S., Huang, Y.-M., & Wu, T.-T. (2024). Enhancing reflective thinking in STEM education through experiential learning: The role of generative AI as a learning aid. *Education and Information Technologies*.
- Xu, W., & Ouyang, F.(2022). The application of AI technologies in STEM education: A systematic review from 2011 to 2021. *International Journal of STEM Education*, 9(1), 59.