

从静态测评到三维表征：大学生批判性思维的进阶测评框架构建及其实践应用

From Static Assessment to Three Dimensional Representation: Advanced Assessment and Practical Application on Critical Thinking of College Students

程玉梅¹, 王瑞宁¹, 乔爱玲¹

¹首都师范大学 教育学院

【摘要】 批判性思维作为培养学生核心素养的基石，也是高等教育在数字化转型期间培养创新型人才的关键抓手，但关于批判性思维的进阶测评仍存在测评框架缺乏层级表征、对批判性思维发展过程数据挖掘不足，难以揭示思维动态发展的问题。基于文献研究与德尔菲专家咨询法，重构涵盖行为表征、认知调节与情感倾向的大学生批判性思维进阶测评框架。进而，通过三维的认知网络分析对实证数据进行深度挖掘揭示了不同阶段的学习者分别在群体、小组及个体层面的认知网络特征。研究发现学习者的批判性思维进阶并非线性增长，呈现出由离散扁平向立体耦合跃迁的结构化特征，且情感倾向在思维进阶中发挥着关键作用；并围绕小组协作学习活动设计、智能体提示词与工作流的设计逻辑提出如何针对测评结果反哺批判性思维的进阶培养。

【关键词】 批判性思维；批判性思维进阶测评；德尔菲法；认知网络分析

Abstract: Critical thinking, as the cornerstone of cultivating students' core competencies, is also a key lever for higher education to cultivate innovative talents during the digital transformation period. However, there are still problems with the advanced evaluation of critical thinking, such as the lack of hierarchical representation in the evaluation framework, insufficient data mining of the development process of critical thinking, and difficulty in revealing the dynamic development of thinking. Based on literature research and Delphi expert consultation method, reconstruct an advanced assessment framework for critical thinking of college students that covers behavioral representation, cognitive regulation, and emotional orientation. Furthermore, deep mining of empirical data through three-dimensional Epistemic Network Analysis revealed the cognitive network characteristics of learners at different stages at the group, group, and individual levels. Research has found that learners' critical thinking progression does not increase linearly, exhibiting a structured transition from discrete flatness to three-dimensional coupling, and emotional tendencies play a key role in thinking progression; And propose how to cultivate advanced critical thinking based on the design logic of group collaborative learning activities, intelligent agent prompt words, and workflow, in response to the evaluation results.

Keywords: Critical Thinking; Advanced Critical Thinking Assessment; Delphi Method; Epistemic Network Analysis

1. 引言

批判性思维作为 21 世纪核心素养的基石，不仅是 5C 能力之一(Ravitz et al., 2012)，更是高等教育在数字化转型期培养创新型人才的关键抓手。然而，随着生成式人工智能(Generative Artificial Intelligence, GenAI)的广泛应用，学习者面临认知外包的风险(余胜泉 & 汪凡淙, 2023)，若学习者缺乏独立的主体性与批判性审视能力，极易陷入对生成内容的无批判性接受，丧失独立思考与深度学习的能力。因此，在人机协同新生态下，如何通过精准的测评引导学生批判性思维进阶发展已成为教育技术领域亟待解决的命题。尽管学术界对批判性思维的重视程度日益提升，但现有的测评仍存在显著结构性滞后，表现为绝大多数测评工具仍沿用标准化测验或自我报告式问卷。这种结果导向的静态测评关注的是学习者在某一时间点上所具备的批判性思维的状态，虽然能通过量化分数划分能力等级，却割裂了思维要素间的复杂的耦合关系，难以揭示学习者在解决复杂问题过程中思维结构的动态演化轨迹与不同阶段的思

维表现差异和发展规律。同时,研究指出学生的思维发展并非突变式,而是呈现由低阶到高阶的层次性增长(Kaldaras et al., 2024),学生的批判性思维也应当具有螺旋递进式的发展特征(Liu et al., 2014)。然而,目前关于批判性思维的进阶测评研究仍存在测评框架缺乏层级表征、对批判性思维发展过程数据挖掘不足以及测评结果与教学反馈闭环缺失三大短板。

为突破上述瓶颈,学习科学中的学习进阶理论为透视的思维发展提供了过程性视角,强调能力发展呈现由低阶到高阶的层次性跃迁(Wilson, 2009)。同时,随着量化民族志与认知网络分析(Epistemic Network Analysis, ENA)等技术的发展,得以从话语交互数据中提取认知结构,将隐性的思维过程转化为可视的网络拓扑图,通过分析节点间连接强度的时空变化,能够动态评估学习者专业思维发展的显著特征(Shaffer, 2017)。这为从关系与结构维度重新审视批判性思维进阶提供了新的方法论支撑。

鉴于此,本研究试图构建面向大学生的批判性思维进阶测评框架,以3D ENA为工具将隐性的思维结构转化为可视化的网络拓扑图,通过实证数据揭示学习者在不同进阶阶段的认知网络特征。本研究将重点回答以下问题:(1)如何通过专家共识形成科学的大学生批判性思维进阶表征框架?(2)基于多模态话语数据,探究不同进阶水平的学习者在群体、小组及个体层面呈现出怎样的认知网络拓扑特征?(3)批判性思维测评的结果如何反哺批判性思维的进阶培养?

2.大学生批判性思维进阶测评的表征框架构建

2.1 批判性思维的结构与进阶测评的表征框架设计

鉴于批判性思维是一种多维度、多路径并发的复杂认知过程,其发生过程往往伴随行为、认知与情感因素的交织协同。因此,研究以系统性、交互性与层级性为基本原则,以国内外具有代表性的四种批判性思维结构为参照,以“行为—认知—情感”三位一体的系统视角对批判性思维结构进行重新设计。研究采用**德尔菲专家咨询**的方式确定批判性思维结构与进阶测评的表征框架。批判性思维结构中,行为指认知技能外显的行为表现,聚焦批判性思维在具体学习任务中的言语表达、问题探究、观点建构、协作辩论等外显行为;认知指元认知主导的自我反思,体现个体在面对复杂、不确定、冲突信息时主动修正、反思与优化思维路径的能力;情感指思维意愿与价值导向的情感驱动。批判性思维进阶测评的表征框架部分,研究参考吴亚婕等人在研究中修订的批判性思维三层次评分量表(吴亚婕 et al., 2015),在批判性思维结构的基础上,将二级维度划分为低阶、中阶与高阶三个水平层次。最后,研究初步设计了包括3个一级指标、11个二级指标、33个观测点的批判性思维进阶测评的表征框架。

2.2 批判性思维进阶测评表征框架的修正

为验证批判性思维进阶测评表征框架的科学性与有效性,研究编制了批判性思维进阶测评表征框架的专家意见征询问卷。研究选取17名高校教育技术学专业的教师作为专家,采用微信与邮件发送的方式进行。经过统计分析,两轮专家意见征询后,各个指标项的平均值逐渐增大,变异系数逐渐缩小(如表1所示),表明专家意见逐渐趋同。

表1 两轮专家意见征询数据分析结果

征询轮次	征询人数	均值范围	标准差	变异系数临界值	变异系数
第一轮	17	2.65~4.82	0.39~1	0.25	2项(0.27、0.28)
第二轮	15	4.31~5	0~0.52	0.12	0项>0.12

2.2.1 第一轮专家意见征询

量化分析结果得出,第一轮专家的权威系数为0.812,高于0.7,表明专家具有较高的权威性,咨询结果可靠(吴扬, 2018)。根据专家反馈意见,研究对表征框架的各维度设置、指标命名与各观测点的表述进行优化,修改内容包括:(1)从一级指标维度和二级指标维度来看,行

为主要指认知的外显行为，认知主要指元认知，建议一级维度名称调整为行为表征、认知调节与情感倾向；(2)二级指标的解释与阐释有重复嫌疑，建议与解释合并，且推断与分析均属逻辑推理的核心环节，合并为分析可避免概念重叠。(3)按照元认知理论所强调的行为修正需依赖策略选择，体现元认知的主动性，建议修改为自我调节；(4)思维开放性表述侧重态度，建议修改名称，修改后的概念应涵盖对自身认知局限的觉察、对自身认知的谦逊，同时，“认知公正性”所指内容与思想开放性中部分重合，建议合并，且合并后的名称修改为“思维的开放性”；(5)求知动机和批判性思维之间似乎缺少直接的逻辑关系，按照上述结构框架，是否指面对复杂问题时需持久探究的意志力，建议修改为探究欲；(6)针对三阶观测点，专家认为部分二级指标的三阶层次递进不明确或表述主题不一，建议系统审查。

2.2.2 第二轮专家意见征询

第二轮专家意见征询主要主要的修改内容如下：(1)各个观测点表述中举例内容的关键取决于省略号后面的语义信息如何，建议表中谨慎举例。(2)建议各个观测点的低阶、中阶与高阶的起点水平要一致。经过两轮专家意见征询后的批判性思维的结构如表 2 所示，批判性思维进阶测评表征框架如表 3 所示。

表 2 批判性思维的结构

一级维度	二级维度	能力表现
行为表征：认知技能外显的行为表现		
	解释	能够准确理解并表达各类信息的含义或用论证的形式清晰地呈现自己的认知过程及结果
	分析	能够对多种形式的信息进行分解，准确识别各类信息中蕴含的要素及其功能
	评价	能够恰当地评价信息来源的可信度以及信息内容的逻辑性
认知调节：元认知主导的自我反思		
	自我监控	对自己的认知活动及活动中使用的要素，推导结果等进行监控，反思个人态度、情感、动机、价值观是否公正
	自我评价	对自己的认知活动、推理过程、结果做出分析与判断
	自我调节	自我检查在意识到错误或不足后，及时补救或修正错误
情感倾向：思维意愿与价值导向的情感驱动		
	思维的开放性	尊重容纳不同观点，避免立场先行或预设偏见，以一贯标准对待各种观点、证据与立场，展现理性与客观
	探究欲	面对复杂问题时是否展现出持续探究的兴趣、愿意提出问题

表 3 批判性思维进阶测评表征框架

一级 维度	二级 维度	三阶 观测点	描述
行为 表征	解释	低阶水平	能简单复述语境中的观点、概念、问题、标准、规则等的含义，但存在表达模糊、结构松散或与原意偏离明显的情况； 对概念含义解释笼统、缺乏上下文依据
		中阶水平	能较准确地说明信息或解释语境中核心观点等内容，但仍无法结合上下文进一步阐释， 仅能提供简单说明
		高阶水平	能准确理解信息含义，结合上下语境进行对比解释，常伴随举例或关联推理
	分析	低阶水平	能识别部分信息，但无法区分主次要点或缺乏对结构的认识，分析视角局限，列出观点 但未具体说明
		中阶水平	能识别信息中的基本结构与主次内容，尝试比较观点间的差异或联系，对话中出现对比 分析行为

		高阶水平	能揭示观点、证据与逻辑之间的隐含关系，或指出矛盾、偏差或逻辑漏洞。如忽略了……，没有解释……
	评价	低阶水平	能够在对话情境中不判断或无法判断信息的可信度，容易顺从他人的观点，缺乏主动质疑的意识和深度的逻辑分析
		中阶水平	能够从可信度、相关性、价值性等多维度评估信息，或识别信息中的逻辑漏洞或不合理之处，能够提出质疑，但更多是基于直觉或简单思考
		高阶水平	能够辩证地分析信息的可靠性，主动质疑信息中的假设、偏见和潜在错误，并提出观点支撑或修正方向
认知 调节	自我 监控	低阶水平	极少在发言中出现对自己理解或任务进展的意识描述，只陈述观点，缺少“我是否理解正确”“是不是可以这样想”等元话语。
		中阶水平	在对话中不确认自己理解或表达的正确与否，依赖他人反馈，或出现自我觉察语言
		高阶水平	能够在对话中清晰反思自己是否存在理解偏差、思路是否清晰、判断是否符合逻辑，对话中出现“我觉得我之前理解偏了，重新来看……”“我们应该忽略了……”“我改一下之前的说法，因为……”等行为。
	自我 评价	低阶水平	学生在对话过程中缺少自我评价
		中阶水平	仅从单一或片面或结果导向对个人观点进行简单判断，缺乏相应证据支撑或自我评价维度单一
		高阶水平	能够对自身观点进行客观评价，并进行自我反思与分析
	自我 调节	低阶水平	对个人观点中存在的漏洞、缺陷或问题，无任何反馈行为
		中阶水平	能够意识到个人观点的缺陷，并尝试提出修正方案，但缺乏针对性与可行性
		高阶水平	能够反思自己的错误或不足，设计有效的补救方法
情感 倾向	思维 的 开 放 性	低阶水平	倾向于维护自我立场，对他人观点不予理解或不考虑他人证据与理由
		中阶水平	能考虑或能认可他人观点，或被动地对异议进行客观评估，但尚未能主动地将不同观点联系起来进行深入剖析。
		高阶水平	主动整合多方观点，引入异见进行对比，体现公正性与对他人观点的包容性
	探究 欲	低阶水平	在外部任务驱动下被动回应问题，缺乏主动提问或进一步探究意图
		中阶水平	能在任务情境中提出需要进一步探索的问题，展现基本的探究意愿
		高阶水平	能够在对话或任务情境中持续提出问题，或者在多个角度提出问题，体现出持续、主动的问题探究意识

3.大学生批判性思维进阶测评表征框架的实践应用

3.1 应用情境

3.1.1 研究对象

研究以北京市某高校教育技术学专业的 49 名本科二年级师范生为研究对象，平均年龄 20-21 岁，男生 28 人，女生 21 人。所有学生均具有网络学习经验，能够利用计算机进行信息检索以及与 GenAI 对话完成小组协作学习任务。

3.1.2 研究过程与研究情境

研究在本科生《信息技术教育》课程中开展，研究过程共 10 周。第一阶段（第 1-2 周）为批判性思维水平前测并进行学生分组，批判性思维水平前测为未进行任何干预下对学生在师星学堂讨论区围绕给定议题进行的发帖与回帖内容进行编码与分析。第二阶段（3-10 周）为教学干预过程，主要开展由生成式智能体赋能的小组协作学习。完成小组任务过程中，所有学生均需要与智能体进行对话并通过微信群或录音的方式进行小组讨论以完成协作任务，

学生所参与的学习活动内容均相同。教学干预结束后，对收集到的所有数据（学生个体与智能体的文本对话内容、小组微信群讨论、小组录音等）进行文本转录，并进行编码与分析。

3.2 数据收集与分析

研究收集了教学干预前后学生发帖与回帖以及学生与生成式多智能体的对话内容，用来分析学生的批判性思维水平发展与特征。在删除无效对话内容后，共收集 1273 条对话数据。随后，两位编码员首先对随机选取的 537 条（占全部对话数据的 42%）数据分别进行独立编码，编码一致性为 0.856，并对不一致地方进行充分讨论，随后分工完成剩余数据的编码。

3.3 研究结果与分析

研究采用 ENA 的方法对学生的批判性思维水平进行分析，探索学生干预前后的批判性思维发展路径。ENA 常用于分析学习者对特定主题的观点，以构建可视化的个人或群体的认知网络来揭示学习者概念之间的关系和结构(Shaffer et al., 2016)。然而，传统的 ENA 通常通过奇异值分解将前两个维度在二维平面上显示，其余维度通常不被检查，这往往忽视了其他维度的重要性。因此，与上述构建的批判性思维三维结构相对应，本研究以三维空间中的认知网络分析为思路(Yu et al., 2024)，通过构建 3D ENA 分析学生批判性思维在行为表征、认知调节与情感倾向的各个维度在低阶、中阶与高阶水平的发展路径，旨在识别批判性思维发展过程中最常出现的核心要素及其共现模式，从而揭示它们的内在关系。

研究对干预前（第一阶段, First stage）与干预后（第二阶段, Second stage）的学生交互文本，分别围绕学习者群体、学习者小组、学习者个体进行了全样本的认知网络分析。研究发现上述三个维度的学习者认知网络结构基本保持一致，表现出由离散扁平向立体耦合的发展变化趋势，也体现出情感倾向作为思维进阶的关键作用。因此，研究随机选择一个学习者小组为例进行展示。

3.3.1 学习者小组批判性思维的频次分析

学习者小组批判性思维进阶前后（First stage VS. Second stage）的交互文本数据如图 3 所示。

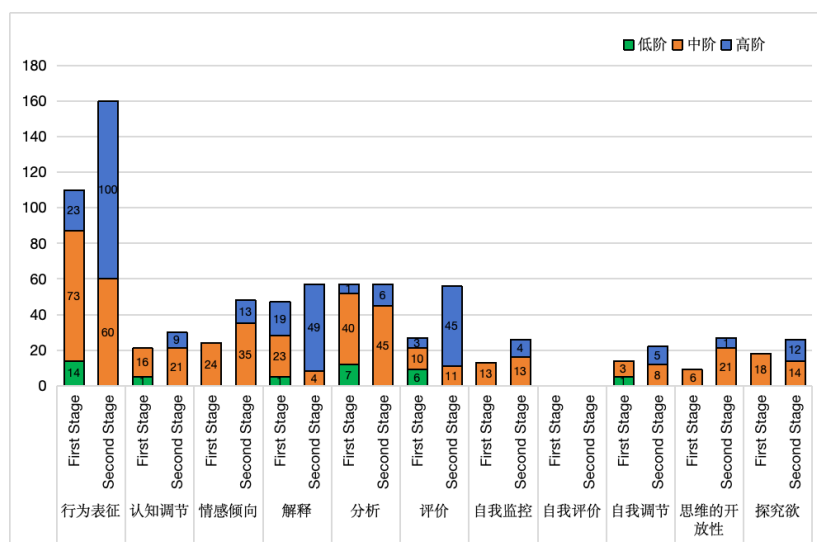


图 3 学习者小组批判性思维进阶前后的行为频次

学习者小组的批判性思维在三个一级维度的行为频次对比中，频次最高的是行为表征和情感倾向，分别占比 69.41%、18.51%；而认知调节行为较少，占 12.08%。行为表征维度中，出现行为频次最高的为分析，占比为 36.67%，解释与评价稍次之，分别占比为 35.56%、27.78%。认知调节维度中，学生小组的自我评价在两个阶段的低中高阶的行为频次仍均为 0，且该维度的交互行为频次主要集中在自我监控与自我调节，分别占比为 63.83%、36.17%。情感倾向维度中，探究欲（61.11%）的行为频次要高于思维开放性（38.89%）。通过对以上每个维度

First stage 和 Second stage 在低中高三个层次出现的行为频次进行对比分析,经过教学干预后,学生小组第二阶段的批判性思维水平在各维度的中高阶层次中的交互行为频次明显上升。

3.3.2 学习者小组批判性思维进阶特征

研究采用 3D ENA 对两个阶段学生的交互文本进行分析,得到学习者小组批判性思维特征的可视化表征,如图 4 所示。

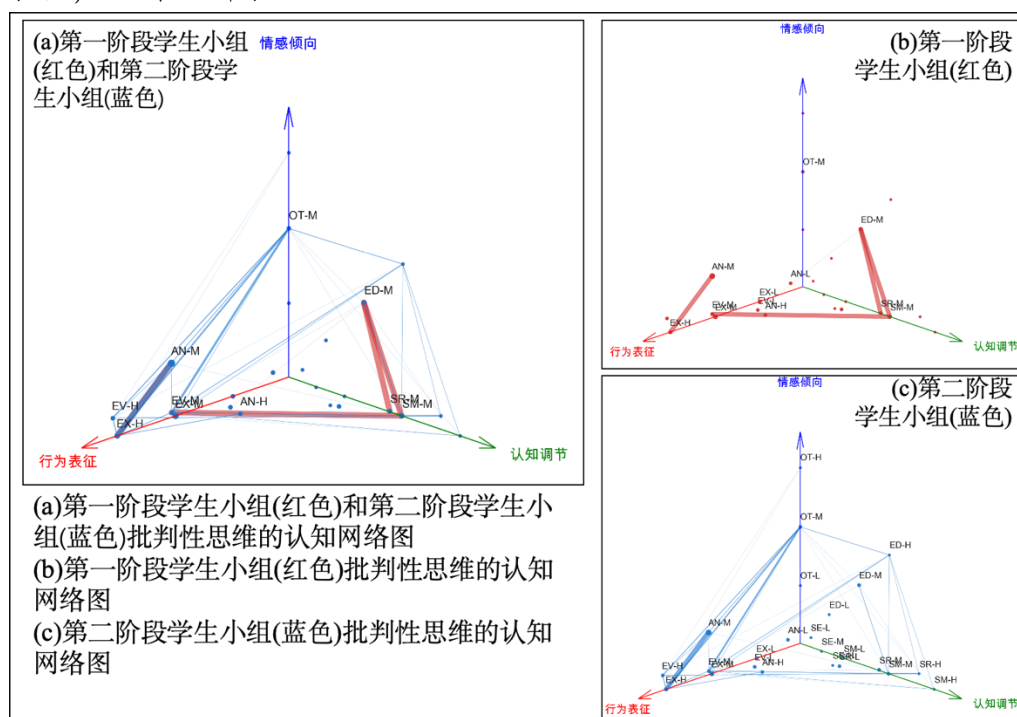


图 4 学习者小组批判性思维进阶前(第一阶段)后(第二阶段)认知网络分析图

图中 X 轴代表行为表征、Y 轴代表认知调节、Z 轴代表情感倾向,节点的大小反应批判性思维能力运用的多少,节点间连线的粗细和颜色饱和度反应批判性思维各能力水平之间的关联程度。图 4(a)展示的是学习者小组在第一阶段(红色)与第二阶段(蓝色)批判性思维的认知网络图,对比两个阶段的群组质心位置与网络拓扑结构,可以发现小组协作从浅层互助向深度协同发展,两个阶段最直观的差异体现在节点数量与 Z 轴(情感倾向)的延展度上。进一步分析发现,图 4(b)第一阶段中解释(EX-M)与分析(AN-M)与自我监控(SM-M)和探究欲(ED-M)之间的关联程度较强,也呈现出一定的思维开放性(OT-M),但分析、自我监控、自我调节等维度在高阶水平层面不足。同时,批判性思维的节点与节点间的连线集中在由解释(EX-M)与自我监控(SM-M)、自我调节(SR-M)构成的二维层面,这表明初期的小组互动主要局限于任务层面的操作执行与基础的认知协调,缺乏高维度的情感投入。图 4(b)学生小组第二阶段批判性思维的认知网络图中,对比来看,第二阶段的学生小组展现出更多的批判性思维节点与节点之间更密集的联系。同时,解释(EV-H)、评价(EV-H)与思维的开放性(OT-M)、探究欲(ED-M)、自我监控(SM-M)、自我调节(SR-M)之间展现出更强的关联性,也呈现出一定的探究欲(ED-H)、思维的开放性(OT-H)、自我调节(SR-H),这表明学生的批判性思维发展进阶尚可,呈现出较大程度的提升。此外,第二阶段的网络结构在 Z 轴方向有所提升,形成了以情感倾向(OT-M)为顶点的立体锥形结构。这一变化也揭示了学生小组中批判性思维进阶的关键机制,情感因素是支撑群体批判性思维进阶的核心,表明小组成员在面对复杂的问题解决时所构建起的积极的探究欲精神与思维开放精神为促进批判性思维进阶提供了契机。

研究发现,学生小组在第一阶段的认知网络较为稀疏且低矮,连线多集中在左侧的行为表征区域,且节点间的共现强度较弱。这反映出学习者初期虽然具备一定的批判性思维技能,但这些技能是碎片化的,缺乏元认知层面的调节与统筹。且在解释(EX)、分析(AN)、评价(EV)、

自我监控(SM)、自我调节(SR)、探究欲(ED)、思维的开放性(OT)各个节点中,均为低阶水平或中阶水平。在学生小组在第二阶段的批判性思维状态中,认知网络呈现出显著扩容与增强态势,整个网络在体积上覆盖了更广的空间,表明个体能够调用更多元的思维策略。同时,网络连线的粗细程度(权重)普遍增加,特别是在分析(AN-H)、评估(EV-H)与自我调节(SR-M)之间形成了闭环,这意味着批判性思维已从单一的技能应用转化为一种结构化的批判性思维。

4. 讨论

实证数据验证了大学生批判性思维进阶测评表征框架的有效性,基于 3D ENA 实现了对大学生批判性思维进阶过程的精准测评与可视化表征,也证实了生成式多智能体赋能的小组协作学习能有效推动大学生批判性思维的进阶发展。基于此,需要进一步探讨如何利用测评结果来优化协作学习设计和生成式智能体的干预策略,以实现批判性思维的进阶培养。

一方面,与以往研究多将批判性思维视为单一维度的能力提升或静态的技能掌握不同,本研究的 3D-ENA 结果显示,批判性思维的进阶并非简单的线性增长,而是一种网络拓扑结构的质变,这一发现有助于修正以往过于强调孤立技能强化的教学倾向,也回应并深化了以往批判性思维的层级结构(文秋芳 et al., 2009),揭示了高阶思维的形成需要超越单一技能训练,转向对思维结构系统性的培养。因此,教学需要优化小组协作学习活动的设计,如指定小组成员进行角色扮演,设定质疑者与评估者等角色,或设置任务的阶段性门槛,要求小组在进入下一阶段前必须先提交前一阶段的反思性报告,帮助小组在行为表征与认知调节之间产生结构化的互动。此外,对于教学教学实践来说,精准有效的层级评价框架也有助于教师了解学生群体内部的批判性思维发展状态,并对学生及时进行干预和指导。如基于评测结果,教师可为学生提供深度参与小组协作的问题讨论的支架。

另一方面,本研究引入生成式多智能体作为协作主体,区别于传统仅依靠教师或同伴的协作模式。研究发现,智能体在其中扮演了脚手架的角色。当学习者陷入认知僵局时,智能体通过苏格拉底式提问而非直接提供答案,有效地激活了学习者的反思。此外,研究表明基于 GenAI 技术的对话机器人能够促进批判性思维的发展(郑兰琴 et al., 2024);这与研究者提到的 GenAI 的协作参与可以提升学习者的批判性思维水平也保持一致(杨宁 et al., 2025)。因此,后续研究可通过提供提示词交互支架与重新设置智能体工作流的逻辑,实现基于学生交互内容的持续监测与系统化反馈。如当智能体检测到学生批判性思维的认知网络中“分析”与“自我调节”的连接权重过低,则智能体的工作流应立即从信息反馈模式切换为元认知反思模式,促使学生审视自己的思维过程而非仅关注任务结果。同时,赋予学生特定的提示词“请你用三句话阐释对方的核心论点,以确保你对其理解是开放且客观的,然后再进行评估”,这种基于结构缺陷的诊断式支架,能够精准地靶向缺失的连接,有效促进思维的结构化发展。

5. 结语

本研究构建了面向大学生的批判性思维进阶测评表征框架,实证结果表明,该框架结合 3D ENA 技术,实现了批判性思维在行为表征、认知调节与情感倾向维度的多维可视化,也从学习者群体、学习者小组与学习者个体三个维度探索了学习者认知网络结构由离散扁平向立体耦合演进的动态轨迹,验证了情感倾向作为思维进阶的关键作用,并围绕小组协作学习活动设计、智能体提示词与工作流的设计逻辑三个方向提出如何针对测评结果反哺批判性思维的进阶培养。然而,受限于数据模态与实验周期,本研究当前主要依赖文本话语分析,难以全面覆盖面部表情、生理信号等非语言维度的潜隐性信息,且对思维进阶的长效保持机制考察尚显不足。未来研究将致力于拓展多模态数据融合视角,提升测评的颗粒度与解释力;

同时，构建嵌入生成式智能体的自适应干预闭环，实现从诊断向即时反馈的测评范式转型，并开展跨学科、长周期的纵向追踪。

参考文献

- 文秋芳, 王建卿, 赵彩然, 刘艳萍, & 王海妹. (2009). 构建我国外语类大学生思辨能力量具的理论框架. 外语界 (01), 37-43.
- 吴亚婕, 赵宏, & 陈丽. (2015). 网络环境下大学生批判性思维培养教学模式的实践. 现代远程教育研究(02), 76-86.
- 吴扬. (2018). 融合幼儿班集体教学活动评价指标体系构建——基于德尔菲法的调查研究. 中国特殊教育(10), 18-25.
- 杨宁, 杨锦, 马子璘, & 林岚. (2025). 生成式人工智能支持的协作问题解决对小学生批判性思维的影响研究. In 电化教育研究 (pp. 104-112).
- 余胜泉, & 汪凡淙. (2023). 人工智能教育应用的认知外包陷阱及其跨越. 电化教育研究, 44(12), 5-13.
- 郑兰琴, 高蕾, & 黄梓宸. (2024). 基于生成式人工智能技术的对话机器人能促进在线协作学习绩效吗?. 电化教育研究, 45(03), 70-76+84.
- Kaldaras, L., Akaeze, H. O., & Krajcik, J. (2024). Developing and validating an Next Generation Science Standards-aligned construct map for chemical bonding from the energy and force perspective. *Journal of Research in Science Teaching*, 61(7), 1689-1726.
- Liu, O. L., Frankel, L., & Roohr, K. C. (2014). Assessing critical thinking in higher education: Current state and directions for next-generation assessment. *ETS Research Report Series*, 2014(1), 1-23.
- Ravitz, J., Hixson, N., English, M., & Mergendoller, J. (2012). Using project based learning to teach 21st century skills: Findings from a statewide initiative. American educational research association conference, Vancouver, Canada,
- Shaffer, D. W. (2017). *Quantitative ethnography*. Lulu. com.
- Shaffer, D. W., Collier, W., & Ruis, A. R. (2016). A tutorial on epistemic network analysis: Analyzing the structure of connections in cognitive, social, and interaction data. *Journal of Learning Analytics*, 3(3), 9-45.
- Wilson, M. (2009). Measuring progressions: Assessment structures underlying a learning progression. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 46(6), 716-730.
- Yu, J., Hu, D., & Wang, C.-H. (2024). Development of ENA 3D: A Tool for Epistemic Network Analysis in Three-Dimensional Space. *Advances in Quantitative Ethnography*, 152-165.