

系统协同与生态转型：美国 STEM 学习生态系统的兴起动因、运行特征与现实挑战

邓莉 缪秋英 林心悦

(华东师范大学国际与比较教育研究所, 上海 200062)

【摘要】 在全球科技竞争加剧与教育系统重构的背景下, 美国近年积极构建 STEM 学习生态系统, 推动多主体协同与跨场域融合。本研究通过对美国 112 个 STEM 学习生态系统案例的梳理与分析, 提出以“实践共同体”为核心、融合生态学习与集体影响理论的三维解释框架, 探讨生态系统的兴起动因、运行特征与制度挑战。研究发现, 美国 STEM 学习生态系统普遍呈现跨部门协同治理、纵横整合学习路径、关注教师专业发展与公平包容导向四大特征, 且面临资金支持不足、协作结构失衡与评估体系碎片化等困境。本研究对中国 STEM 教育改革的启示包括: 推进系统协同治理、构建多元学习场域、发展教师实践共同体与完善动态评估机制等。

【关键词】 STEM 学习生态系统; 系统协同; 实践共同体; 生态学习; STEM 教育

【中图分类号】 G511.9

【文献标识码】 A

【文章编号】 1007-2179(2025)05-0055-15

一、引言

STEM(科学、技术、工程与数学)教育被广泛作为推动科技进步、经济发展与社会创新的关键策略, 成为国家在全球竞争中提升人力资本与创新能力的重要抓手(邓莉等, 2024; 彭正梅等, 2018; Sahito & Wassan, 2024)。然而, STEM 教育的发展并非仅凭学校教育即可实现, 需要多元主体协同与联动(蒋帆等, 2023), 以系统性方式提升学生的跨学科素养、创新与实践能力。

近年来, STEM 学习生态系统(STEM Learning

Ecosystem)作为一种促进 STEM 教育协同创新的治理结构与实践平台, 在整合教育资源、连接多元主体、拓展学习场域与提升学习成效方面展现出巨大潜力。STEM 学习生态系统一般指地方性、区域性或全州性的网络、联盟或多部门合作伙伴关系, 由非营利组织牵头或多部门共同领导, 涵盖学校、非正式教育机构、企业、高校、政府和社区组织等多元主体, 旨在为青少年提供贯穿各教育阶段、联通多元学习空间的 STEM 教育资源与实践路径(U.S. Congress, 2022; CoSTEM, 2018)。该生态系统强调协同治理与实践共建, 实践共同体、生态学

【收稿日期】2025-07-25

【修回日期】2025-08-20

【DOI编码】10.13966/j.cnki.kfjyyj.2025.05.007

【基金项目】 国家社会科学基金教育学青年课题“中美竞争背景下美国教育战略及中国应对研究”(CDA220273)。

【作者简介】 邓莉, 华东师范大学国际与比较教育研究所副教授, 教育部国别与区域研究基地北京师范大学国际教育研究中心兼职研究员, 国家民族事务委员会“一带一路”国别与区域研究中心华南师范大学东南亚文化教育研究中心特聘研究员, 研究方向: 美国教育、芬兰教育(ldeng@ed.ecnu.edu.cn); 缪秋英、林心悦, 硕士研究生, 华东师范大学国际与比较教育研究所, 研究方向: 美国教育、芬兰教育等。

【引用信息】 邓莉, 缪秋英, 林心悦(2025). 系统协同与生态转型: 美国 STEM 学习生态系统的兴起动因、运行特征与现实挑战[J]. 开放教育研究, 31(5): 55-69.

习与集体影响等理论为生态系统的组织机制、学习路径与跨制度协作提供了依据与指导。其中, 实践共同体(Community of Practice)理论强调基于共同实践议题形成持续互动与知识共享社群, 已被美国“STEM 学习生态系统倡议”(STEM Learning Ecosystems Initiative)官方文件明确作为核心理念(STEM Ecosystems, 2025a); 生态学习理论(Ecological Learning)关注学习作为人与环境持续互动的过程, 强调跨场域、系统性学习机制, 支持生态系统在场域整合与资源协同方面的发展(National Research Council, 2009); 集体影响理论(Collective Impact)聚焦多元主体共同推动复杂议题变革的行动逻辑, 为生态系统的制度化运行与责任共担提供框架支持(Kania & Kramer, 2011)。因此, STEM 学习被视为跨越学校、家庭、社区等空间持续生成的过程, 既包括正式课堂教学, 又涵盖非正式学习(Bang et al., 2010; Banks et al., 2007; Bell et al., 2012)。在这一理念的推动下, 非正式学习逐渐被纳入 STEM 教育体系, 为 STEM 学习生态系统构建提供了实践基础。2009 年, 美国国家研究委员会(National Research Council, 2009)发布《非正式环境的科学学习: 人、场所与活动》报告, 呼吁将博物馆、科技馆、课外项目等非正式渠道纳入科学教育体系。2014 年以来, 美国校外 STEM 教育展现出强劲的发展势头(陈舒等, 2017)。2014 年, 美国国家研究委员会教师咨询委员会(Teacher Advisory Council of the National Research Council)与加州教师咨询委员会联合主办“STEM 学习无处不在”全国研讨会, 提出推进正式、非正式与校外教育的深度融合, 并深入探讨 STEM 学习生态系统的概念与建构(National Research Council, 2014)。同年, 诺伊斯基基金会(Noyce Foundation)发布《跨部门合作如何推动 STEM 学习》报告, 首次使用“生态系统”比喻教育资源的协同结构, 将 STEM 学习生态系统界定为整合学校教育、课外项目、科技馆与社区组织等多元主体的创新网络(Traphagen & Traill, 2014)。

在理念与政策的双重推动下, 美国各地积极推进 STEM 学习生态系统建设, 并通过跨区域协作网络实现资源共享与协同发展。2015 年, 诺伊

斯基基金会(Noyce Foundation)等与非营利组织成立 STEM 资助者网络(STEM Funders Network), 并发起“STEM 学习生态系统倡议”, 在全国遴选 27 个点试点, 组建 STEM 学习生态系统实践共同体(STEM Ecosystems, 2025b)。该倡议旨在推动各地构建 STEM 生态系统, 设计沉浸式 STEM 学习体验, 开拓学习者通向 STEM 职业与劳动力市场的路径, 进而实现教育与经济体系的深度融合(STEM Ecosystems, 2025c)。截至 2025 年 7 月, 该实践共同体已发展为涵盖美国 43 个州及阿根廷、加拿大、哥伦比亚、冰岛、以色列、肯尼亚、墨西哥和乌干达 8 个国家共 121 个节点的全球教育创新网络(STEM Ecosystems, 2025a)。该网络由 STEM 卓越教育研究所(Teaching Institute for Excellence in STEM)统筹运营, 负责战略规划、成员遴选与活动组织, 致力于为各地生态系统之间的经验交流、资源共享与协同创新提供支持平台。

2018 年起, STEM 学习生态系统建设被正式纳入美国国家教育战略。白宫和 STEM 教育委员会(CoSTEM)发布的《制定成功路线: 美国 STEM 教育战略》首次将“培育联结 STEM 共同体的生态系统”列为政策优先事项, 强调通过多元主体协同、跨层级合作推动 STEM 教育纵深发展(National Science and Technology Council, 2018)。2022 年, 《芯片和科学法案》明确提出培育 STEM 生态系统, 以增强 STEM 教育资源, 提升整体教育效能(U.S. Congress, 2022)。2024 年, 白宫科技政策办公室发布《推进 STEM 教育和培养 STEM 人才联邦战略计划》, 提出“构建跨部门、跨领域协同网络与生态系统”是实现国家 STEM 人才储备目标的关键路径, 并将其确立为 STEM 教育委员会核心任务之一(National Science and Technology Council, 2024)。至此, STEM 学习生态系统实现了从理念倡议、地方试点, 到被纳入国家战略并进入联邦立法的逐步嵌入过程, 形成以多元协作、系统治理和跨场域整合为特征的创新教育结构。

美国 STEM 学习生态系统地位的日益凸显, 在一定程度上引发学术界关注, 但研究多聚焦特定地区的个案实践或生态系统建设策略。例如, 有学者分析塔尔萨区域 STEM 联盟运行机制与可持续性

(Allen et al., 2020b)、奥马哈生态系统多方利益相关者对成功要素的认知(Daubert, 2021)、加利福尼亚州某地区生态系统跨部门协作的障碍与机遇(Liou & Daly, 2021)以及辛辛那提市 STEM 学习共同体的成功经验(刘亮亮等, 2018)。赵中建等(2015)指出, STEM 学习生态系统的核心在于整合正式、非正式与课外教育, 通过跨部门协作构建多元融合学习环境, 以拓展学生的个性化学习机会与 STEM 素养。总体而言, 这些研究缺乏对美国 STEM 生态系统发展现状与共性特征的系统性、全景式梳理。本研究选取“STEM 学习生态系统倡议”覆盖的 112 个美国本土生态系统为研究对象, 系统梳理其官方网站发布的目标愿景、行动路径、关键项目、实践成果与合作网络等内容, 探讨其兴起的现实动因、组织与运行的主要特征以及面临挑战。值得一提的是, 2025 年恰逢该倡议提出十周年, 主办方将于 10 月在美国华盛顿举办十年发展成果与经验总结大会, 这亦为本研究提供了系统回顾的契机。

二、以实践共同体为核心的 三维理论

美国 STEM 学习生态系统已形成跨区域、跨部门、跨领域协作的复杂网络, 其运行机制既体现在政策治理与资源整合层面, 也涵盖学习路径、协作文化与专业发展等维度。为深入剖析其系统特征与运行逻辑, 本研究构建了以实践共同体为核心、融合生态学习与集体影响的三维解释框架。该框架契合 STEM 生态系统的官方理论指引, 也有助于从治理结构、学习机制与协作文化维度系统理解其构建逻辑与实践挑战。

(一) 实践共同体理论: 多元主体协同的治理逻辑

实践共同体理论由埃蒂安·温格-特雷纳与贝弗莉·温格-特雷纳(Wenger-Trayner & Wenger-Trayner, 2015)提出, 用以解释人们如何因共同的兴趣、目标或实践而组成持续互动的群体, 并通过集体实践不断学习与创新。该理论强调, 学习并非仅在个体内部发生, 而是在实践社群的互动中生成。实践共同体常由三个核心要素构成: 一是共享关注的领域(domain), 它为共同体设定边界和价值基础;

二是由关系驱动社区(community), 体现成员间的相互信任、协作与归属感; 三是积累与共享实践(practice), 即长期互动形成的经验、方法与工具。该结构突出协同学习的知识基础, 强调实践在知识生成中的核心地位。

实践共同体理论的七项培育原则为生态系统的组织机制与运行逻辑提供了操作框架: 1) 为演化而设计(design for evolution), 即生态系统需具备适应性与开放性, 能回应社会、政策与技术的变化; 2) 打开内部与外部的对话, 即鼓励跨部门知识交流与经验碰撞, 形成创新认知; 3) 邀请不同层次人员参与, 即核心成员、活跃参与者与外围观察者, 形成多层次互动网络; 4) 开发公共与私密的社区空间, 即既有开放共享平台, 又有小规模、深度合作空间; 5) 聚焦价值, 即所有协作活动以为学习者、社区及产业创造有意义的价值为导向; 6) 结合熟悉感与兴奋感, 即保持生态系统稳定性的同时, 融入创新元素, 激发成员参与热情; 7) 为社区创造节奏感, 即定期开展活动和交流机制维持社区活力与粘性(Wenger-Trayner & Wenger-Trayner, 2015)。此外, 实践共同体内部常存在“核心—边缘”结构, 不同成员的参与程度、知识贡献和网络角色存在差异, 但在持续互动中形成流动性参与。这一特征为理解 STEM 生态系统中学校、企业、高校等主体在协作强度与专业角色上的差异提供理论支撑(Wenger-Trayner & Wenger-Trayner, 2015)。

STEM 学习生态系统通过“关系网络”而非行政命令实现协同治理。学校、企业、高校、非营利组织等围绕 STEM 教育这一议题, 构成高度互动、知识共享、持续演化的实践共同体。

(二) 生态学习理论: 学习路径与资源整合的机制解释

生态学习理论关注学习者与环境的动态交互过程, 强调学习的情境性、多场域性与系统性。该理论有助于解释如何通过打通“幼儿园—大学—职业”的纵向学习路径, 构建从早期兴趣激发到高阶能力建构的连续性学习机制。该理论强调学习并非孤立发生的认知行为, 而是嵌入文化、社会与空间关系的发展性过程(Barron, 2006)。学习者在家庭、学校、社区与虚拟空间等环境持续互动, 构

成动态生成的“学习生态”。由此, 教育资源配置、社会结构与学习机会之间的关联被纳入分析视野, 凸显在结构性不平等情境中支持弱势学习群体的重要性(Nasir & Hand, 2006)。此外, 生态学习理论还提供理解教育公平与资源可及性挑战的分析工具, 特别是在应对数字鸿沟、城乡差异与弱势群体支持方面, 为 STEM 学习生态系统的公平导向提供理论支撑。在非正式与跨场域学习场景中, 学习者如何在“人—地—活动”系统互动中生成知识、建构身份与发展能力, 也成为生态学习理论关注的核心议题(Bevan & Michalchik, 2013; National Research Council, 2009)。

(三) 集体影响理论: 多元协作与制度建设逻辑
集体影响理论由约翰·卡尼亚与马克·克雷默(Kania & Kramer, 2011)提出, 强调在复杂社会议题中实现系统性变革需具备的关键要素: 共同议程、共享衡量体系、相互强化的行动、持续沟通与骨干支持组织。该理论为理解 STEM 学习生态系统如何调动政府、学校、企业、高校与非营利组织等开展协同治理提供了理论视角。在实践中, 各 STEM 生态系统围绕共同愿景设立议程文件, 通过高校或非营利组织担任骨干机构, 推动资源整合与行动落实。在 STEM 生态系统由多个机构联合推动、面临治理碎片化与责任模糊问题的背景下, 集体影响理论强调跨主体协调机制与可持续性支持路径, 为其提供了操作框架。

综上, 本文构建的三维理论框架整合 STEM 学习生态系统多元理念背后的内在逻辑, 为理解其组织演化、学习整合与协同治理提供了系统性分析工具。

三、研究方法

本研究采用文本分析法, 以美国“STEM 学习生态系统倡议”覆盖的 112 个生态系统(见图 1)案例为样本, 缘由如下: 第一, 该倡议自 2015 年启动, 至今已十年, 有较强的国内外影响力。十年来, 该倡议已从最初的 27 个试点生态系统扩展至 121 个, 覆盖美国 43 个州的城乡地区, 并延伸至 8 个国家, 影响 4200 多万名 PK-20(从学前至研究生教育阶段)学习者、90 万名教师与非正式教育者, 以及

4600 多个慈善组织、企业与行业合作伙伴(STEM Ecosystems, 2025d)。第二, 该倡议涵盖的美国本土生态系统数量庞大且类型多样, 能为深入理解 STEM 生态系统运行机制提供案例依据。美国 112 个生态系统按服务范围可分为 22 个州级生态系统(statewide)和 90 个地方/区域(regional/local)生态系统。前者侧重于整合州内资源; 后者聚焦县(county)、市(city)、学区、地区(region)或都市圈(metropolitan area), 有更强的地域适应性与差异化特征。

本研究共开展两轮数据收集, 第一轮始于 2025 年 1 月, 当时倡议官网公布的美国生态系统共 100 个(全球共 107 个); 2025 年 3 月, 扩展至 112 个(全球共 121 个), 研究团队随即补充了新增生态系统的数据库。数据来源包括: 1) 倡议官网对整体项目及各生态系统的介绍; 2) 各生态系统官网发布的愿景目标、行动路径、重点项目、实践成效与合作网络等文本资料。需说明的是, 文中所用的生态系统案例作为整体样本用于归纳分析, 除直接引用的内容列入参考文献外, 其他资料未逐一注释; 所有相关案例均可在倡议官网获得。

本文采用反思性主题分析法(Reflexive Thematic Analysis Method)编码和归类所收集到的文本材料(Braun & Clarke, 2021), 包括: 1) 熟悉材料。三位研究者分别阅读全部文本材料, 形成初步理解, 并标注反复出现的关键词。2) 初始编码。围绕研究问题构建开放式初始编码框架, 提取与生态系统动因、跨部门协作、社会参与、教育资源整合、学习路径设计、教师发展支持、弱势群体扶助、资源配置等相关的内容单元。3) 主题生成与凝练。研究者完成初始编码后进行集中比对, 识别重合与模糊项, 通过协商优化编码体系, 凝练初步主题, 如“重视 STEM 劳动力培养”“多元主体协同”“教育到就业的衔接路径”“校内外学习整合”“教师专业成长支持”“代表性不足群体的赋权机制”等。4) 主题审查。将初步主题与原始数据进行系统比照, 反思有无遗漏重要内容? 主题能否准确反映文本含义? 有无表达不清或交叉重叠情形? 针对发现的问题, 研究者对主题进行多轮修订, 包括细化、整合或删除主题, 并根据新增信息补充遗漏主题。

5)主题命名与确认。在不断回溯文本与集体协商的基础上,研究者最终确定并命名主题,确保其清晰边界,有高度解释力。6)撰写分析报告。研究者以最终确立的主题为框架,系统呈现美国 STEM 学习生态系统的兴起动因、运行特征与现实挑战。

四、兴起背景与政策动因

美国 STEM 学习生态系统的兴起并非偶然,而是多重因素叠加推动下的系统性回应。本文将它归纳为三个层面:全球层面的社会挑战推动教育模式转型,国际层面的竞争格局激发人才培养压力,国内层面的教育与就业脱节呼唤跨阶段、跨场域的系统重构。

(一)回应全球社会挑战对跨学科教育的系统需求

“全球社会挑战”(Global Societal Challenge)概念由欧盟“地平线 2020”计划(Horizon 2020)提出,涵盖气候变化、水资源短缺、能源安全和网络安全等议题。这些问题普遍具有高度不确定性、系统性与跨学科属性,以单一学科为核心的学校教育已难以胜任未来公民能力的培养。STEM 学习生态系统强调多元主体协作,强调学科融合与真实问题导向,为应对全球性挑战提供了回应。以 2019 年新冠疫情为例,这一全球公共卫生事件推

动多个地区迅速联合利益相关方,组建 STEM 学习生态系统,以应对疫情带来的教育不平等与学习中断问题,以更好地适应不断变化的全球环境。

(二)国际竞争格局变化引发的人才与经济焦虑

国际竞争格局变化也加速美国 STEM 教育的改革与实践。新加坡、中国上海等地在 PISA 测试中名列前茅,被美国视为“前所未有的竞争者”(STEM Ecosystems, 2018)。这引发美国教育界对教育体系能否培养具有全球竞争力人才的担忧。出于对人力资本结构的焦虑,越来越多的 STEM 学习生态系统将“培养全球竞争力人才”作为核心使命。例如,纽瓦克 STEM 生态系统提出通过 STEM 教育提升学习者的全球竞争力;橙县 STEM 计划认为,STEM 教育与培训将直接决定该地区是否具备能在全球市场竞争的高技能劳动力队伍。基于这一使命,各地生态系统普遍重视培养合作、问题解决、沟通能力和领导力等关键的社会、学习和就业技能。佛罗里达州棕榈滩县 STEM 学习生态系统致力于帮助学生掌握在全球经济中取得成功所需的批判性思维、创造力、协作与沟通能力(STEM Ecosystems, 2025e)。

随着 STEM 产业在推动国家和地区经济活力中扮演越来越关键的角色,社会对 STEM 人才的需求也持续增长。数据显示,美国 2016 年计算机类

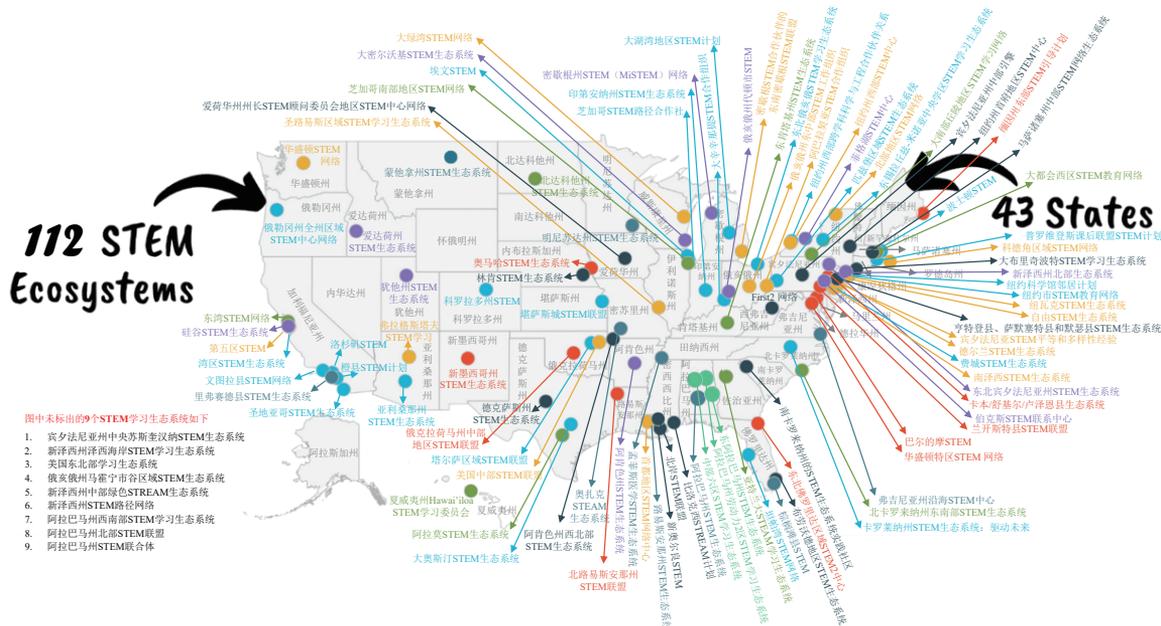


图1 美国 STEM 学习生态系统地理分布^①

岗位需求比 2006 年增长 35%(STEM Ecosystems, 2018)。以亚利桑那州为例, STEM 类岗位 2017 至 2027 年间预计增长 21%, 主要集中于计算机技术、先进制造、航空航天与国防、生物科学等领域(STEM Ecosystems, 2025f)。然而, 美国劳动力市场结构性失衡问题日益凸显, 人才技能与岗位要求错配成为制约发展的关键瓶颈。为解决这一问题, 各州和地区纷纷将 STEM 人才培养作为推动经济增长的重要路径, 引导学生在“高工资”“高需求”的 STEM 行业领域实现“职业成功”已成为众多生态系统的目标定位(STEM Ecosystems, 2025g; STEM Ecosystems, 2025h)。这一趋势与美国国家战略高度契合。美国联邦政府发布的两份五年期 STEM 教育发展规划——《制定成功路线: 美国 STEM 教育战略》《推进 STEM 教育和培养 STEM 人才联邦战略计划》, 均强调将其作为增强国家竞争力、支撑经济持续繁荣的战略工具。

(三) 弥合学校教育与发展脱节的策略

“割裂性”问题是 STEM 学习生态系统力图解决的核心症结, 主要体现在两个方面: 其一, 各阶段教育之间缺乏有效衔接, 学前至高中教育、高等教育与职业教育之间的路径不连贯, 学生从课堂走向职场面临阻力, 且难以满足 STEM 领域的人才需求; 其二, 正式教育与非正式教育之间缺乏整合, 学校教育与博物馆、课外活动等未能有机联动, 限制学习者在真实情境的应用实践与综合发展。

STEM 学习生态系统旨在通过多方协作搭建“教育—职业”联通机制, 成为打破系统割裂、促进路径融合的平台。例如, 波士顿生态系统(BoSTEM)由波士顿课后及拓展学习联盟和麻省诸塞湾联合劝募会 2015 年共同发起, 联合一批高绩效非营利组织, 为 6 至 8 年级学生提供课后 STEM 课程与职业探索机会, 帮助他们为 21 世纪工作环境作好准备。新泽西州北部生态系统由伯根社区学院(Bergen Community College)牵头, 致力于与 K-12 学区、政府机构、高等教育机构以及公共和私营部门组织建立联系, 构建从 K-12 到高等教育再到行业的贯通式 STEM 教育路径。

由此可见, STEM 学习生态系统着力打通教育阶段之间的断裂, 还通过整合非正式学习资源与社

区支持, 形成贯通“学段—空间—职业”的协同路径。这一平台式联动机制, 为学生提供连续性、情境化的发展机会, 也回应了生态学习理论所强调的“学段贯通+场域融合”的学习支持逻辑。

五、运行特征与机制

STEM 学习生态系统通过多部门协同治理、纵向学习路径贯通和横向资源整合、教师专业能力提升和教育公平保障等机制, 构建稳定运行的体系。在机制不断优化的过程中, STEM 学习生态系统始终坚持以学习者为中心的理念, 强调多元主体的协作服务于学习者的全面发展与能力提升。

(一) 协同架构: 共同议程与骨干组织

在多元协作机制中, “共同议程”与“骨干支持组织”构成生态系统高效运作的两大核心要素。共同议程指所有参与方围绕 STEM 教育发展的共同目标与问题形成共识, 并对实现路径达成集体认同与行动承诺(Kania & Kramer, 2011)。在“STEM 学习生态系统倡议”框架下, 各地生态系统通过多方协作制定书面发展议程, 为合作实践提供清晰指南。骨干组织通常由具备中立性与执行力的高校、政府或区域行业联盟担任, 负责推进共同议程的落地实施。其职责包括政策协调、资金运作、资源共享与人才培养支持。借助骨干组织的统筹协调, 政府部门、教育机构、企业、非营利组织、社会场馆、行业协会与联盟、媒体与信息平台、社区组织与家庭、投资机构与创业孵化器九类关键主体围绕统一目标协同合作, 在政策制定、资源配置、产业联动、社会动员与传播等方面发挥各自优势, 推动 STEM 学习生态系统持续运行与发展(见表 1)。

具体来看, 政府在生态系统构建中主要发挥政策引导与财政支持的作用, 推动形成多部门联动、上下贯通的支持体系。联邦与州政府通过专门计划提供财政投入, 为生态系统发展奠定基础。例如, 美国教育部通过“教育创新与研究”计划向波士顿地区 STEM 项目提供为期五年 390 万美元资助; 2020 年, 俄亥俄州代顿市 STEM 生态系统获得美国国防部 STEM 教育联盟的协同支持, 推动国防系统资源与地方教育系统的整合。

教育机构尤其是高等教育机构, 在生态系统中

表 1 STEM 学习生态系统各类主体角色分工与支持机制

合作主体	典型子主体	主要作用	支持机制
政府部门	联邦及地方政府、教育行政部门、国家科学基金会	制定 STEM 教育与科技创新政策和战略; 提供财政支持和政策激励; 整合跨部门资源推进合作	通过政策引导和财政投入构建生态系统基础保障机制
教育机构	K-12 学校、高等(职业)院校、科研机构(国家实验室、研究中心)	K-12 学校负责基础教育和 STEM 知识普及; 高校与科研机构承担人才培养、前沿研究和成果转化	教育资源与科研能力构成知识创新和人才供给的核心支撑
企业	大型科技企业、高新技术企业、中小型创新企业和初创公司	引入产业视角; 提供实践机会与技术资源; 通过产学研合作推动技术转化和成果应用	以资金、技术和市场经验支撑科技成果转化与应用
非营利组织	教育基金会、科技推广协会、公益机构	搭建跨界合作平台; 组织培训、研讨和科普活动, 推动教育公平与资源共享	依托社会资本和专业网络整合资源, 提升系统协同效能
社会场馆	博物馆、科技馆、图书馆	构建非正式 STEM 学习场域; 通过展览、互动体验和科普活动激发公众兴趣	通过展示与互动资源提升公众科学参与感与体验性
行业协会与联盟	相关行业组织、联盟	协调行业协作力量; 推动标准制定与行业协作; 组织跨企业或跨区域合作交流	行业资源与信息共享机制提升跨主体协作效率
媒体与信息平台	传统媒体、新媒体平台、科普网站	传播 STEM 教育活动和成功案例; 提供信息发布、交流和舆论引导平台	发挥传播平台影响力, 提升公众参与度和认知水平
社区组织与家庭	当地社区、家长委员会、志愿者团体	联动社区力量推动 STEM 活动和家长教育参与; 为学校与企业合作提供支持	借助家庭与社区支持, 扩大 STEM 教育覆盖面
投资机构与创业孵化器	风险投资机构、孵化器、加速器	提供资本支持; 推动科技成果转化与创新项目孵化; 提升科技研发的市场适应性	通过资本投入和市场机制, 促进技术研发与商业模式落地

兼具资源供给者与人才培养者双重角色, 并发挥“智库”职能。高校作为牵头组织统筹区域资源。例如, 新泽西州北部生态系统由卑尔根社区学院主导建设, 整合本地教育资源推进区域 STEM 整体规划。高校还通过校地合作项目将触角延伸至 K-12 教育体系。以佛罗里达州棕榈滩县生态系统为例, 佛罗里达大学与学区合作开展数百万美元规模的综合性 STEM 项目, 联合多所高等院校为中小學生提供丰富的课程。此外, 一些高校还承担专业咨询与理论指导职能, 如诺瓦东南大学在布劳沃德地区生态系统担任顾问机构, 提供师资和智力支持。

企业也是重要主体。企业与高校协同开展产教融合, 借助产业情境提升人才培养的实践性与针对性。例如, 阿肯色医学科学大学与联合太平洋铁路公司等企业合作, 为学生提供实地参访与项目体验机会。企业还通过导师计划等直接参与教育创新, 如堪萨斯城 STEM 联盟(KC STEM Alliance)动员企业员工担任中小学 STEM 导师, 协助教师设计实践型课程, 推动教学内容与行业需求对接。

除政府、教育机构、企业外, STEM 行业协会、非营利组织、社会场馆等也发挥着重要功能。行业

协会依托其标准制定与资源整合能力, 促进跨行业协作; 非营利组织通过跨界协调与公共倡导, 提升教育公平与社会认同度; 投资机构能带动技术转化与成果推广; 媒体与信息平台通过传播手段扩大公众影响力; 社区组织与家庭推动 STEM 活动落地, 延展学习空间, 构建学习共同体。表 1 梳理了 STEM 学习生态系统各类主体的角色分工与支持机制。

为清晰地呈现各类合作主体在生态系统中的组织结构与协同逻辑, 图 2 以学习者为中心, 展示典型 STEM 学习生态系统中骨干组织如何统筹政府、教育机构、企业等, 构建跨部门协作与多元共治的网络架构(STEM Ecosystems, 2025c), 推动生态系统高效运行与可持续发展。“学习者”位于系统的核心位置, 正是前文所述“以学习者为中心”理念的形象化体现, 强化多元协同机制服务于学习者成长的目标导向。相较于表 1 按政策功能划分的九类合作主体, 图 2 强调系统内多方协作的结构性能展现, 二者表达维度有所差异, 互为补充。

(二) 学习路径的纵向贯通与横向整合

STEM 学习生态系统致力于打通正式教育体系不同学段之间的壁垒, 还强调整合非正式教育资



图2 STEM 学习生态系统多元协作主体与学习者中心定位

源, 构建“校内+校外”融合发展的整体格局, 为学习者提供多元、灵活的成长路径选择。这集中体现了生态学习理论“学习—环境交互”与“多场域整合”的基本理念, 即通过打通学段、融合场域与嵌入式学习空间, 展现系统性、情境性与发展性的学习支持机制。

STEM 生态系统在路径设计上体现了贯通发展理念, 实现“幼儿园—小学—中学—大学—职业”之间的顺畅衔接, 推动从早期兴趣启蒙、学科探索到后期技能认证与职业实践的连续培养。学前阶段常通过游戏化与项目化教学方式, 将数学、技术、科学等元素有机融入, 引导儿童发展好奇心与探索意识。例如, 亚特兰大 STEAM 学习生态系统支持的圣安妮学校 (Saint Anne’s Day School) 和科学幼儿园 (Science Akadémeia) 以富有趣味性与参与感的方式, 激发儿童对 STEM 的初步兴趣。在兴趣启蒙的基础上, STEM 生态系统通过系统性的课程体系 and 持续支持, 推动学习路径的纵向延展。例如, 亚特兰大生态系统覆盖的国际学校中, 小学阶段学生便接受系统化的计算机科学与数字素养教育, 初中阶段参与社会创业与专业课程, 高中阶段可获得计算机相关认证并深入研究特定领域。为促进高中至大学阶段的平稳过渡, 湾区 STEM 生态系统通过国家科学基金会资助的“STEM 推进” (STEM PUSH) 网络推动建设大学预科课程, 拓宽学生通往高等教育和科研的路径。此外, STEM 生态系统构建纵向学习路径时注重融入人工智能等新兴技术, 推动学生持续发展相关技能。例如, 东北佛罗里达

区域 STEM2 中心以职业发展为导向, 从学前教育阶段起引入人工智能、编程、计算机科学、机器人技术、无人机、数据科学等技术, 并通过多样化的职业探索活动, 促进学生发展批判性思维、创新精神和创业思维。

校外资源的深度整合为 STEM 素养的持续培养提供实践场景与支持条件。生态系统通过横向整合技术设备、社区资源、节庆文化与课外项目, 拓展学习空间, 丰富学习形式; 引入企业与科研机构的专业资源, 如笔记本电脑计划、无人机平台和可移动实验室等, 为学生提供接触前沿科技的机会, 提升其实践与问题解决能力, 同时缓解地区发展不均与数字鸿沟对学习机会的制约。此外, 校外资源也为 STEM 教学注入多样性与真实性。波士顿生态系统通过邀请工程师、科学家、程序员等专业人士担任志愿导师, 带领学生参与机器人技术、微生物实验、金融建模等项目式学习。同时, 该生态系统与汤普森岛户外教育中心合作, 依托波士顿港群岛国家公园的生态资源, 开发地方性科学课程, 融入以体验式与挑战性为特色的拓展训练 (Outward Bound) 教育理念, 促进学生科学认知、环境意识与人格发展的协同成长。节庆文化与社区参与也被广泛用于激发学习动机、拓展学习边界。例如, 匹兹堡区域 STEM 生态系统的“重塑学习日”、宾夕法尼亚州东北部的 STEM 工业庆典、新泽西州德尔兰地区的 STEAM 博览会等活动, 均成为学生、教师与家庭之间的重要连接平台。这类活动通过营造仪式感与社群参与氛围, 增强学生学习成就感及对未来职业的初步认知。暑期夏令营等项目亦被广泛运用, 它通过沉浸式体验填补传统学期教育的空档, 增强学生对 STEM 领域的兴趣。值得注意的是, 美国总统特朗普 2025 年 4 月 23 日发布行政命令“推动美国青少年人工智能教育发展”后, “STEM 学习生态系统倡议”积极响应, 呼吁各生态系统关注学生人工智能素养 (AI Literacy) 发展, 并与企业、高等教育机构及社区组织深化合作, 共同设计并开展人工智能学习体验, 加强人工智能素养培养 (STEM Ecosystems, 2025i)。

(三) 教师专业发展的支持机制

教师是 STEM 教育高质量发展的关键力量, 其

专业能力直接关系 STEM 课程实施的有效性与学生 STEM 素养的养成。在 STEM 学习生态系统建设中, 几乎所有案例均设有面向教师和教育工作者的专业发展项目, 致力于通过多元路径支持教师成长。综合来看, 这些项目主要包括依托高校资源的师资培养模式、校企合作的实践导向型培训、短期集中研修与持续支持、激励与专业表彰机制以及依托新兴技术的师资培养模式。

依托高校资源的师资培养模式构成 STEM 教师专业发展的基础支撑。此类项目往往由州政府或联邦机构资助, 联合高校教育学院与研究机构共同开发适配不同学段与地区需求的 STEM 教育课程。例如, 阿拉巴马州 STEM 生态系统实施的 UTeach 项目, 发端于德克萨斯大学奥斯汀分校, 后扩展至多州高校联合推进, 强调在学科知识与教学实践之间建立紧密联系。该项目由州政府、基金会、非营利组织等机构共同资助(高巍等, 2019)。又如, 宾夕法尼亚州卡本县、舒基尔县和卢泽恩县的 STEM 生态系统通过职业学校平台为小学低年级教师提供结构化、层级化的 STEM 教育能力提升方案。校企合作机制能有效弥补传统教育机构现实场景应用方面的短板, 为教师提供产业一线经验。教师实习(externships)、驻校教师计划(teacher-in-residence)等项目鼓励教师“走出校园、走入行业”, 在真实工作环境了解 STEM 技术的应用逻辑与行业趋势, 增强教学的实践导向性。例如, 阿拉巴马州教师实习项目通过与本地企业建立合作, 安排教师进入实验室或研发中心短期实习, 提升其实践教学能力。短期培训与集中研修项目能为教师提供灵活高效的持续学习机会, 常以暑期学院、工作坊和研讨会等形式展开, 注重专业知识更新与教学策略创新。例如, 塔尔萨区域 STEM 联盟感官探索科学夏令营提供为期两天的暑期课程以及秋季和春季的延续培训, 提升教师的科学教学能力; 指数增长数学研究所开展为期一年的数学教师专业发展项目, 聚焦数学概念理解、数学素养和思维品质提升。激励与表彰机制是促进相互强化的行动与维系骨干支持体系的关键环节。多个生态系统建立教师奖项、教学创新小额资助等举措, 对课程开发、教学改革与学生指导表现突出的教师给予

持续认可与激励, 提升教师积极性。依托新兴技术的师资培养模式强调教师将人工智能工具有效整合进课堂, 增强学生学习体验。例如, 明尼苏达州 STEM 生态系统 2024 年 9 月联合本地先进制造卓越中心在伯米吉州立大学(Bemidji State University)举办人工智能教育峰会, 为教育工作者及 STEM 项目提供者提供将人工智能融入课程的能力支持; 东北俄亥俄州 STEM 学习生态系统(Northeast Ohio STEM Learning Ecosystem)与可汗学院合作开展培训项目, 支持教育工作者利用人工智能工具增强学生个性化学习体验。

这些教师发展项目通常汇聚多元资金与平台支持。高校与州政府多关注基础性师资建设, 企业和行业协会侧重于现实应用培训, 基金会和非营利组织则灵活投入短期项目与创新试点。国家自然科学基金会等联邦机构提供专项资助, 成为推动多地区、跨机构协同发展的关键支点。

重要的是, STEM 生态系统逐步形成由教师、专家、企业从业者等共同构成的“实践共同体”, 它以协作与共享为核心, 突破传统教师发展“个人—机构”的单线条关系, 转向“群体—网络”的系统协同。教师不仅在其中学习与成长, 且成为生态系统教学改革与课程创新的积极参与者与推动者。已有研究指出, 教育工作者与 STEM 从业人员合作有惊人的力量(Subramanian & Clark, 2016)。这种跨界联动重塑了教师的专业身份, 也推动其从“教学执行者”向“知识共建者”和“制度参与者”转型, 充分体现出实践共同体与集体影响双重理论逻辑的系统协同效应。在部分运行良好的生态系统中, 共同体内部常呈“核心—边缘”结构的协同模式, 部分教师作为课程改革领军人物深度参与项目设计与资源整合, 另一些教师处于外围观察与逐步介入阶段。这种流动性的参与机制体现了实践共同体成员参与程度与专业角色的层次差异, 有助于生态系统内部形成梯度成长与持续学习的支持环境, 从而增强教师专业发展的系统韧性与可持续性。值得注意的是, 随着人工智能等新兴技术的不断融入, 这种共同体不仅拓展了教师的专业成长空间, 也为生态系统的长期演化注入活力。

(四) 促进公平与包容的制度安排

STEM 学习生态系统致力于减少女性、少数族裔、低收入群体、农村学生等不利群体的参与障碍, 围绕“提升资源可及性”与“设计差异化支持方案”两条路径, 推动公平、多元和包容性教育。这一目标体现了集体影响理论的“共同议程”与“骨干支持组织”的制度治理逻辑, 且契合生态学理论关于“学习—环境动态交互”与“文化相关性教学”的核心主张。

一方面, 生态系统聚焦资源分配不均与获取渠道局限, 积极缩小“数字鸿沟”与地理差异带来的教育不平等。例如, 亚利桑那州科技生态系统 (Arizona SciTech Ecosystem) 依托“小型免费图书馆”项目, 为偏远与低收入地区学生提供包含实验材料、编程硬件和教学手册在内的 STEM 工具包, 有助于突破基础设施不足对学习机会的限制。北卡罗来纳州东南部 STEM 生态系统联合克拉姆登研究所, 为家庭经济困难学生配备家用电脑并提供优质在线课程资源, 提升弱势学生的信息素养与学习能力。

另一方面, 生态系统通过量身定制的项目和课程, 回应特定群体的兴趣与发展需求, 提升其在 STEM 领域的参与度与自我认同。例如, 多地生态系统积极设立“编程女孩俱乐部”“女孩编程项目”等项目, 为女生提供从兴趣启蒙到技能培养的一体化支持。东北佛罗里达区域 STEM2 中心面向 3-12 年级女生开设分阶段课程, 提升其计算思维与编程能力。纽约西部跨学科科学与工程合作伙伴关系联合当地女童子军、布法罗州立学院和企业伙伴在暑期举办计算机技能训练营, 帮助城市核心区女孩掌握前沿技术。多地生态系统还引入“百万女性导师” (Million Women Mentors) 等支持机制, 通过线上指导、实地见习、实习计划、职业赞助等, 为女生提供持续陪伴与引导。圣地亚哥 STEM 生态系统圣地亚哥大学女性工程师项目基于“文化相关性教学”原则, 依托大学工程专业女生为 K-12 女生提供一对一辅导与实践指导, 激发其学科兴趣与职业志向。

STEM 生态系统还高度重视少数族裔、低收入群体和农村学生等的参与机会与成长支持。多个

生态系统通过徽章认证、奖学金、职业实习等举措, 支持少数族裔学生进入高等教育及相关职业领域。波士顿生态系统下设拉丁裔 STEM 联盟专为拉丁裔学生开发机器人课程和课后项目, 提升其技术技能, 并促进其在 STEM 领域的参与度和能见度。针对农村学生, 生态系统注重通过发放工具包、远程平台接入与榜样引领等方式, 降低参与门槛、拓宽接触路径。西弗吉尼亚州 First2 网络以 FIRST 大使计划为抓手, 支持大学生和农村学生返乡分享学习经验, 并参与课程设计与学生指导, 以“来自相似背景的声音”激发本地学生学习热情与自我认同, 构建具有关联性、激励性的支持性生态系统, 推动边缘地区的教育公平。

六、现实挑战

STEM 学习生态系统面临的资金和资源不均衡、多元主体间协作失序与低效、质量与效果有待优化等挑战, 制约着其可持续发展潜力。

(一) 资金支持有限与资源分配不均

根据密歇根州 STEM 网络 (MiSTEM Network) 的经验, STEM 计划自我维持需满足四项条件: 符合利益相关者 (包括家长及学校专业人士) 的需求、获得学区或中级学区行政部门的支持、被推动者纳入常规工作计划以及拥有可替代初始补助金的持续性收入来源 (MiSTEM, 2024)。其中, 资金支持始终是制约生态系统建设发展的关键瓶颈: 一是生态系统的创建和维护成本较高, 其支出包括数据库、门户网站和可视化数据平台等基础设施的建设与维护费用, 还涉及专职人员的配置、评估目标的实现以及与学校建立深入合作关系等工作费用 (Allen & Noam, 2016)。二是“获得资金本身是一项挑战” (Allen & Noam, 2016)。许多资助机构倾向于直接资助面向学生的项目, 而非支持生态系统的组织能力建设与系统性改进 (Allen & Noam, 2016)。有研究指出, 构建一个成熟的 STEM 网络通常需要 10-12 年的持续投入, 而主流资助周期一般为 3-5 年 (Kezar & Gehrke, 2017)。INCLUDES 项目的实践也表明, 五年期的支持难以实现深层次的系统性转型; 尤其是建立生态系统协作基础设施, 往往需要长期投入, 这使得整体变革周期进一步延

长(Payton & Gates, 2023)。时间跨度不匹配, 凸显了集体影响理论中资金配置周期与系统变革进程之间的错位。成功的集体影响倡议要求有稳定且持续的财政支持作为“骨干支持组织”运行的基础保障, 但当前资金投入周期远远滞后于系统演化周期, 造成系统性协同平台的建设难以为继。缺乏长期财政支撑不仅削弱了行动的一致性, 也降低了生态系统内主体对共同议程的信心与承诺。此外, 生态系统财政支持结构的短期导向也与“为演化而设计”的实践共同体原则相冲突。资金安排应具备适应性与前瞻性, 以支持生态系统面对政策调整、技术变革与社会挑战时的自我调适与动态成长, 而非陷入依赖一次性资助的脆弱状态。资金周期与系统演化节奏之间的严重不匹配, 成为生态系统可持续发展的结构性障碍。许多 STEM 学习生态系统“半途而废”, 难以取得预期成效。

与资金问题并行的, 是资源分配不均带来的参与壁垒。在资源匮乏的地区或家庭, 青少年往往因缺乏必要的社会支持与经济保障, 难以平等地参与 STEM 学习生态系统。已有研究表明, 青少年能否“驾驭”STEM 教育, 取决于与其兴趣相关的校内外学习资源的可用性和可及性(accessibility), 以及通过重要成年人获得的社会、文化和经济资本支持(Shaby et al., 2021)。具体而言, 家庭社会资本决定了学习者能否接触 STEM 相关的人际网络与信息渠道; 文化资本影响学习者对 STEM 活动的价值认同与参与意愿; 经济资本限定了学习者获取 STEM 教育产品与服务范围与质量。学习并非孤立发生, 而是在特定环境系统通过“场域联动”实现的。资源配置不均意味着弱势群体在正式与非正式学习场域的嵌入能力不足, 学习路径无法贯通, 兴趣激发难以持续转化为能力成长。任何一种资本的缺失, 都可能阻碍青少年探索的欲求, 尤其在学习活动之间缺乏清晰衔接与路径引导的情况下, 许多学生容易陷入“找不到与自身兴趣相契合的下一个机会”的困境, 难以实现持续深入发展(Shaby et al., 2021)。

因此, STEM 生态系统的建设仅靠项目层面的活动推动远远不够, 更需要在治理结构中纳入“资源可及性”“多场域支持机制”“环境适配性”等

原则, 确保学习者都能所处的真实情境中持续发展, 真正实现生态系统的公平性与包容性。

(二) 多元主体协作面临失序与低效困境

STEM 学习生态系统实际运行还面临诸多协作障碍。系统内部多方参与者之间沟通不足、目标不一甚至运作脱节等, 都会使合作关系停留在交易型合作(transactional partnerships)层面, 难以实现真正意义的深度协作与协同创新。一方面, 生态系统高度依赖少数核心组织的资源与连接能力, 这种集中模式易削弱整体网络的多样性与灵活性。虽然实践共同体理论承认“核心—边缘”结构, 强调流动性与协同演化, 但实际运行中, 部分生态系统未能有效激活边缘成员的参与意愿与成长通道, 导致结构固化、互动单向, 难以实现“邀请不同层次人员的参与”与“为演化而设计”的初衷。边缘主体缺乏参与动力与空间, 也使生态系统容易受到核心组织或外部环境的影响, 降低稳定性与韧性。另一方面, 学前至高中教育系统在生态系统中的作用被严重边缘化。学前至高中教育系统参与度低, 未能成为资源中介与协作枢纽, 导致其连接性和影响力不足(Liou & Daly, 2021)。这一结构失衡表明生态系统尚未真正构建“公共与私密的社区空间”, 无法让学校系统成为“共同实践”的核心成员, 制约了教育系统与社区、产业的有机融合。多元协作失效也反映了“共同议程”和“相互强化行动”之间缺乏协同配套机制。

美国部分州和地区正积极应对这一协作困境。例如, 东北俄亥俄州 STEM 学习生态系统通过明确共同利益, 推动企业、高校、科研机构、基层社区、博物馆、政府机构和公共事业部门等建立稳定的协作关系, 打破传统部门壁垒, 强化沟通机制与协同创新网络, 持续推进 STEM 学习机会的拓展与区域经济协同发展。类似的, 新泽西州北部生态系统强调核心伙伴关系的连续性与互补性, 致力于实现生态系统建设与产业发展、职业前景的有效衔接, 尝试打造“相互强化的行动平台”, 以支撑未来劳动力培养与提升区域竞争力。此外, 越来越多生态系统开始借助数据驱动的方法优化协作模式, 即通过构建共享数据平台、可视化进度仪表盘与标准化评估工具, 提高合作效率与沟通质量。然而, 整

体来看, 这些探索仍集中于少数区域, 协作失衡、边缘主体沉默、学校系统被弱化等问题依然普遍存在, 生态系统的多元协同尚未形成可持续的制度支撑与文化共识。

(三) 质量评估过程与效果有待优化

为促进 STEM 学习生态系统的持续改进与提升 STEM 学习效果, 各地生态系统普遍设立了定期评估与监测机制。但整体来看, 评估过程仍存在严重的不一致性问题: 一方面, 不同生态系统所处地区与发展重点差异显著, 不同评估工具, 如学生调查、观察量表、教师问卷等, 缺乏统一的评估标准和方式。这导致不同生态系统难以有效比较, 也限制对其长期影响的纵向跟踪与反思。另一方面, 即便在同一生态系统内部, 不同参与主体的评估目标和方法也存在分歧: 学校侧重看学业表现, 博物馆强调兴趣激发, 企业聚焦职业启蒙。这种目标分化削弱了生态系统多元主体“相互强化行动”基础, 不利于构建以“共同议程”为导向的系统性协作格局。这也意味着参与者“聚焦共同价值”与“协同反思实践”基础被削弱, 不利于学习型社群的演化与自我调整。

为回应这一问题, 美国大多数 STEM 生态系统采用统一的衡量标准, 尝试构建多层次、可比性的评估体系(Allen et al., 2020a)。部分生态系统通过建立国际数据集来评估干预成效, 跟踪学生及生态系统本体的发展变化; 另一些生态系统则根据本地需求进行适应性调整, 在标准化与灵活性之间取得平衡(Allen & Noam, 2016)。例如, 奥马哈 STEM 生态系统依托多方协作网络推广“共享 STEM 术语体系”(shared STEM lexicon), 在协作伙伴之间形成对学习成果、教育价值与绩效指向的共同理解, 从而重建跨部门之间的沟通机制与制度信任(Daubert, 2021)。不少生态系统开发和定制适配性评估工具, 并提供相关培训和技术支持, 以提升利益相关方使用的可操作性与理解度。这是构建“持续沟通”机制的制度化体现, 有助于推动生态系统内部建设具有“创造节奏感”的实践共同体。然而, 这些评估机制仍处于探索阶段, 缺乏统一的制度规范与长期运行实践, 难以支撑大规模系统性反馈与教育改进。

评估数据的收集与使用也面临深层困境。例如, 学生和家长等核心利益相关者的声音常被边缘化。调查显示, 学生自我报告在生态系统决策者眼中往往被视为“低可信度”数据, 特别是与由专家主导的教学观察数据相比(Allen & Noam, 2016)。这种取向违背了生态学习理论“环境与学习者互动共构”的基本逻辑, 忽视学生作为“生态系统内行动者”的反馈作用。其次, 评估动机的异化也应引起警惕。许多评估数据的采集大多遵循交易(quid pro quo)逻辑, 即 STEM 从业者往往出于满足资助方要求或完成绩效考核等外部压力, 而非出于教育改进的内在需求(Allen & Noam, 2016)。大量重复性问卷和填表任务转移了教育工作者的关注焦点, 他们不得不围绕数据达成而非学生发展调整教学。这不仅侵蚀实践共同体“基于成员共同价值进行持续学习”的文化基础, 且使“聚焦价值”的评估目标演变为“量化控制”的外部任务。此外, 大多数评估活动仍采用事后反思方式, 数据分析结果往往在教育实践结束后才能生成, 难以及时支持与干预教学(Allen & Noam, 2016)。时效性滞后削弱了生态系统作为“支持性适应性学习机制”的调节能力, 使其难以在学生兴趣下滑、学习动机减弱等早期迹象出现时及早干预。

七、结论与启示

美国 STEM 学习生态系统的建构, 并非源于单一政策主张或孤立的学科整合实践, 而是在全球科技竞争加剧、劳动力结构调整与教育系统职能重塑的多重压力下, 在政策、学术、市场与社会力量的交汇中逐步孕育而成。它不仅回应了 STEM 教育自身的发展诉求, 更深刻体现了未来教育系统的整体性变革趋势。作为一种新型教育组织形态, STEM 学习生态系统致力于最大程度地调动和整合多元主体的优势资源, 构建面向全龄群体、跨场域联动的学习支持环境, 以培养具备全球视野、协作能力与创新素养的未来公民。

整体来看, 美国 STEM 学习生态系统呈四方面特征: 一是通过“共同议程”与“骨干组织”构建跨部门协同治理架构, 整合政府、高校、企业、非营利组织等资源, 构建系统高效的合作机制; 二是

纵向上打通幼儿园至职业发展的学习路径, 横向融合校内外教育资源, 打造“校内+校外”一体化生态学习空间, 增强 STEM 学习的连续性、实践性与多样性; 三是高度重视教师专业成长, 通过高校支持、校企合作与建设实践共同体, 推动教师成为教学变革的核心力量; 四是以公平、多元与包容为核心理念, 聚焦女性、少数族裔、低收入等边缘群体, 提升资源可及性, 推动教育机会均等。

美国 STEM 学习生态系统推进亦面临结构性挑战。首先, 资金支持不足与资源分配不均, 生态系统难以持续发展, 尤其不利于边缘地区和弱势学生群体的全面参与; 其次, 多元主体之间的协作机制尚不成熟, 生态系统常出现沟通脱节与角色失衡问题, 学前至高中教育机构边缘化尤为突出; 再次, 评估体系不统一、工具异化与数据滞后, 削弱了教育改进的针对性和系统性。上述困境印证了本研究提出的三维解释框架的理论解释力, 也表明系统性变革仍需制度、文化与能力层面的共同支撑。美国生态系统经验在理念、机制与实践方面能为中国 STEM 教育改革提供以下参考:

第一, 建立多元协作机制, 推进系统协同治理。中国 STEM 教育改革亟需突破教育系统内部治理的局限, 在国家层面构建由教育、科技、财政、人力资源等多部门协同参与的统筹协调机制(蒋帆等, 2023), 推动确立“共同议程”明确与责任分工, 如在省域或区域层面设立试点生态系统, 探索高校、企业、非营利组织与基础教育协同育人的可行路径。第二, 整合多元学习资源, 拓展生态学习路径, 包括在国家课程框架下嵌入 STEM 导向的跨学科项目式学习内容, 引导中小学与科技馆、科研机构、企业等建立课程共建机制, 打通从兴趣激发到职业发展的纵向学习链条; 结合“劳动教育”平台, 打造“课内—课外—社会”联动的学习场域, 提升学习的真实感、体验感与延展性。第三, 建设教师实践共同体, 推动专业支持系统转型, 包括鼓励师范院校、教研机构与一线教师建立区域性 STEM 教师学习共同体, 推进教师培训与课程研发一体化; 通过嵌入式支持、项目式合作与同行互助, 强化教师在 STEM 教育改革中的参与感与领导力; 建立区域性教师支持中心, 统筹师资发展资源。有研究指

出, STEM 教师的培养亟需多利益相关方共同参与, 建立系统化的课程保障与协同机制, 以实现可持续发展(高巍等, 2019)。第四, 完善评估体系, 强化数据反馈与动态调适机制, 包括: 构建覆盖政策执行、教学过程与学习成效的多元评估体系; 鼓励地方开发与本地实践契合的评估工具, 同时在国家层面形成可比性强的核心指标体系; 重视学生与教师的反馈, 将评估过程由“合规性工具”变为“改进型机制”, 实现教育实践与评估结果之间的良性循环。

成功的 STEM 学习生态系统应如健康的自然生态系统, 各参与主体互为支撑、动态互动、共促成长(Maslyk, 2021)。中国在推动 STEM 教育发展进程中, 应立足本土实际, 构建跨部门协同、校内外贯通、多元主体共治的教育新格局, 不断提升教育体系的系统性、协同性与创新性。这既是实现教育现代化与国家创新力跃升的关键举措, 更是建设教育强国、支撑高质量发展的战略支点。

[注释]

① 截至 2025 年 7 月美国 112 个 STEM 学习生态系统分布。圆点代表各生态系统分布, 反映该倡议在美国的广泛覆盖与网络化特征。本图在“STEM 学习生态系统倡议”官网图像(<https://stemecosystems.org>)基础上补充了信息与标注。

② 2018 年, 美国国家科学基金会发起了 INCLUDES 计划(现称 Eddie Bernice Johnson INCLUDES 倡议), 旨在推动超越单一项目的全国性系统变革, 构建促进协作与资源共享的基础设施, 以提升代表性不足群体(如非裔、拉丁裔、原住民、残障者、女性及低收入者)在 STEM 领域的参与度, 为其提供更多专业发展机会。

[参考文献]

- [1] Allen, P. J., & Noam, G. G. (2016). STEM learning ecosystems: Evaluation and assessment findings[R/OL]. [2025-07-24]. https://stemecosystems.org/wp-content/uploads/2017/01/STEMEcosystems_Final_120616.pdf.
- [2] Allen, P. J., Brown, Z., & Noam, G. G. (2020a). STEM learning ecosystems: Building from theory toward a common evidence base[J]. IJREE—International Journal for Research on Extended Education, 8(1): 15-16.
- [3] Allen, P. J., Lewis-Warner, K., & Noam, G. G. (2020b). Partnerships to transform STEM learning: A case study of a STEM learning ecosystem[J]. Afterschool Matters, 31: 30-41.
- [4] Bang, M., Medin, D., Washinawatok, K., & Chapman, S. (2010). Innovations in culturally based science education through partnerships and community [M]//New science of learning: Cognition, computers and collaboration in education. New York, NY: Springer New

York: 569-592.

[5] Banks, J. A., Au, K. H., Ball, A. F., Bell, P., Gordon, E. W., Gutierrez, K., Heath, S. B., Lee, C. D., Lee, Y., Mahiri, J., Nasir, N. S., Valdes, G. & Zhou, M. (2007). Learning in and out of school in diverse environments: Life-long, life-wide, life-deep[R/OL]. [2025-07-24]. <https://informalscience.org/research/learning-and-out-school-diverse-environments-life-long-life-wide-life-deep/>.

[6] Barron, B. (2006). Interest and self-sustained learning as catalysts of development: A learning ecology perspective[J]. *Human Development*, 49(4): 193-224.

[7] Bell, P., Bricker, L. A., Reeve, S., Zimmerman, H. T., & Tzou, C. (2012). Discovering and supporting successful learning pathways of youth in and out of school: Accounting for the development of everyday expertise across settings[M]/LOST opportunities: Learning in out-of-school time. Dordrecht: Springer Netherlands: 119-140.

[8] Bevan, B., & Michalchik, V. (2013). Where it gets interesting: Competing Models of STEM Learning after School[J]. *Afterschool Matters*, (17): 1-8.

[9] Braun, V., & Clarke, V. (2021). Can I use TA? Should I use TA? Should I not use TA? Comparing reflexive thematic analysis and other pattern - based qualitative analytic approaches[J]. *Counselling and Psychotherapy Research*, 21(1): 37-47.

[10] 陈舒, 刘新阳(2017). 美国校外 STEM 教育成效评价: 视角、框架与指标 [J]. *开放教育研究*, 23(2): 102-110.

[11] Committee on Science, Technology, Engineering, and Math Education (CoSTEM) (2018). Progress Report on the Implementation of the Federal STEM Education Strategic Plan[R/OL]. [2025-07-24]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2017/12/Progress-Report-Federal-Implementation-STEM-Education-Strategic-Plan-Dec-2020.pdf>.

[12] Daubert, H. L. (2021). Stakeholder perceptions of success within a STEM ecosystem[D]. University of Nebraska at Omaha:3.

[13] 邓莉, 陈丽莎, 王超男(2024). 美国教育发展战略的时代特征与基本逻辑: 从美苏冷战到中美竞争 [J]. *外国教育研究*, 51(2): 21-38.

[14] 高巍, 刘瑞, 范颖佳(2019). 培养卓越 STEM 教师: 美国 UTeach 课程体系及启示 [J]. *开放教育研究*, 25(2): 36-43.

[15] 蒋帆, 邓莉(2023). 多中心治理: 美国 STEM 教育治理实践的经验与启示 [J]. *比较教育学报*, (2): 66-78.

[16] Kania, J., & Kramer, M. (2011). Collective impact[J]. *Stanford Social Innovation Review*, 9(1): 36-41.

[17] Kezar, A., & Gehrke, S. (2017). Sustaining communities of practice focused on STEM reform[J]. *The Journal of Higher Education*, 88(3): 323-349.

[18] Liou, Y. H., & Daly, A. J. (2021). Obstacles and opportunities for networked practice: A social network analysis of an inter-organizational STEM ecosystem[J]. *Journal of Educational Administration*, 59(1): 94-115.

[19] 刘亮亮, 李雨锦(2018). 美国中小学 STEM 学习生态系统研究——以辛辛那提市 STEM 学习共同体为例. *现代教育技术*, 28(10): 113-119.

[20] Maslyk, J. (2021). Why an ecosystem approach advances STEM learning[EB/OL]. [2025-07-24]. <https://blog.definedlearning.com/blog/stem-education-ecosystem>.

[21] MiSTEM (2024). 2024 MiSTEM Annual Report[R/OL]. [2025-07-07]. [https://www.michigan.gov/leo/-/media/Project/Websites/leo/Doc-](https://www.michigan.gov/leo/-/media/Project/Websites/leo/Documents/MiSTEM/Reports/2024-MiSTEM-Annual-Report.pdf)

[uments/MiSTEM/Reports/2024-MiSTEM-Annual-Report.pdf](https://www.michigan.gov/leo/-/media/Project/Websites/leo/Documents/MiSTEM/Reports/2024-MiSTEM-Annual-Report.pdf).

[22] Nasir, N. S., & Hand, V. (2006). Exploring sociocultural perspectives on race, culture, and learning[J]. *Review of Educational Research*, 76(4): 449-475.

[23] National Research Council (2009). Learning science in informal environments: People, places, and pursuits[R/OL]. [2025-07-24]. <https://doi.org/10.17226/12190>.

[24] National Research Council (2014). STEM learning is everywhere: Summary of a convocation on building learning systems[R/OL]. [2025-07-24]. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/18818/stem-learning-is-everywhere-summary-of-a-convocation-on-building>.

[25] National Science and Technology Council (2018). Charting a course for success: America's strategy for STEM education[R/OL]. [2025-07-24]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2018/12/STEM-Education-Strategic-Plan-2018.pdf>.

[26] National Science and Technology Council (2024). Federal strategic plan for advancing STEM education and cultivating STEM talent[R/OL]. [2025-07-24]. The White House Office of Science and Technology Policy. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2024/11/2024fedSTEMplan.pdf>.

[27] Payton, F. C., & Gates, A. Q. (2023). The role of institutional leaders in driving lasting change in the STEM ecosystem[J]. *Issues in Science and Technology*, 39(4): 73-80.

[28] 彭正梅, 邓莉(2018). 培养具有全球竞争力的美国人——基于 21 世纪美国四大教育强国战略的考察 [J]. *比较教育研究*, 40(7): 11-19.

[29] Sahito, Z., & Wassan, S. H. (2024). Literature review on STEM education and its awareness among teachers: An exploration of issues and problems with their solutions[J]. *SAGE Open*, 14(1): 1-21.

[30] Shaby, N., Staus, N., Dierking, L. D., & Falk, J. H. (2021). Pathways of interest and participation: How STEM - interested youth navigate a learning ecosystem[J]. *Science Education*, 105(4): 628-652.

[31] STEM Ecosystems (2018). STEM Learning Ecosystems Initiative Overview[R/OL]. [2025-07-25]. https://stemecosystems.org/wp-content/uploads/2018/03/SLE-Cohort-4-Webinar_FINAL.pdf.

[32] STEM Ecosystems (2025a). OUR NETWORK: The Community of Practice[EB/OL]. [2025-07-24]. <https://stemecosystems.org/first-community-of-practice/>.

[33] STEM Ecosystems (2025b). FAQs[EB/OL]. [2025-07-07]. <https://stemecosystems.org/faqs/>.

[34] STEM Ecosystems (2025c). About[EB/OL]. [2025-07-23]. <https://stemecosystems.org/about/>.

[35] STEM Ecosystems (2025d). STEM Ecosystems[EB/OL]. [2025-07-21]. <https://stemecosystems.org/>.

[36] STEM Ecosystems (2025e). PBC STEM[EB/OL]. [2025-07-07]. <https://stemecosystems.org/ecosystem/pbc-stem/>.

[37] STEM Ecosystems (2025f). Arizona SciTech Ecosystem[EB/OL]. [2025-07-07]. <https://stemecosystems.org/ecosystem/arizona-scitech-ecosystem/>.

[38] STEM Ecosystems (2025g). Northeast Florida Regional STEM2 Hub, Inc[EB/OL]. [2025-07-07]. <https://stemecosystems.org/ecosystem/northeast-florida-regional-stem2-hub-inc/>.

[39] STEM Ecosystems (2025h). MiSTEM Network[EB/OL]. [2025-07-07]. <https://stemecosystems.org/ecosystem/mistem-network/>.

[40] STEM Ecosystems (2025i). Advancing AI and Institutional

Excellence: What Executive Orders Mean for STEM Ecosystems [EB/OL]. [2025-08-19]. <https://stemecosystems.org/executive-orders-4-2025/>.

[41] Subramanian, R., & Clark, S. (2016). The partnership of university, industry and K-12 schools to improve awareness of STEM fields[C]. 2016 ASEE Mid-Atlantic Section Conference. Washington D. C.: American Society for Engineering Education.

[42] Traphagen, K., & Traill, S. (2014). How Cross-Sector Collaborations are Advancing STEM Learning[R/OL]. [2025-07-24]. https://smile.oregonstate.edu/sites/smile.oregonstate.edu/files/stem_ecosystems_report_execsum_140128.pdf.

[43] U. S. Congress (2022). Chips and Science Act of 2022[R/OL]. [2025-07-24]. <https://www.congress.gov/117/plaws/publ167/PLAW-117-publ167.pdf>.

[44] Wenger-Trayner, E., & Wenger-Trayner, B. (2015). Introduction to communities of practice: A brief overview of the concept and its uses. Social Learning Lab[EB/OL]. [2025-07-24]. <https://www.wenger-trayner.com/introduction-to-communities-of-practice/>.

[45] 赵中建, 龙玫(2015). 美国 STEM 学习生态系统的构建[J]. 教育发展研究, 35(5): 61-66.

(编辑: 魏志慧)

Systemic Collaboration and Ecological Transformation: The Emergence, Operational Features, and Practical Challenges of STEM Learning Ecosystems in the United States

DENG Li, MIAO Qiuying & LIN Xinyue

(*Institute of International and Comparative Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

Abstract: *With global technological competition and structural shifts in education systems, the U.S. has actively constructed STEM Learning Ecosystems to overcome the limitations of traditional education. This study systematically reviewed and analyzed 112 STEM learning ecosystem cases in the United States STEM Learning Ecosystems Initiative. This study proposes a three-dimensional analytical framework with the Communities of Practice at its core, integrating Ecological Learning and Collective Impact Theories. It examines the key drivers behind these ecosystems, their operational characteristics, and institutional challenges. The findings reveal four common features of U.S. STEM Learning Ecosystems: Cross-sector collaborative governance, vertically and horizontally integrated learning pathways, teacher professional development, and a strong commitment to equity and inclusion. Meanwhile, they face challenges such as inadequate funding, fragmented coordination, and underdeveloped assessment systems. Drawing on these findings, the paper offers several implications for China's STEM education reform, including enhancing system-wide collaborative governance, expanding multi-context learning environments, developing teacher communities of practice, and improving dynamic evaluation mechanisms, all of which provide theoretical insight and practical guidance for understanding the organizational evolution and ecological development of STEM education.*

Key words: *STEM learning ecosystem; systemic collaboration; communities of practice; ecological learning; STEM education*