

国内外学习进阶研究评述与演进趋势分析

张舒雅¹, 赵媛²

(1. 南京师范大学教师教育学院, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 学习进阶引领了 21 世纪科学教育的变革与发展, 也得到了各学科领域的认可与重视。以中国知网(CNKI)以及 Web of Science(WOS)核心数据库中学习进阶相关期刊文献为研究样本, 通过 CiteSpace 软件进行可视化分析, 得到国内外学习进阶领域的研究热点, 分析研究热点差异的原因并对未来趋势做出预测。研究表明, 学习进阶国内研究主要集中在核心素养、概念构建以及教学实践 3 个方面; 国外研究主要集中在学习进阶不同主题、广度拓展以及有效性研究 3 个方面。国内外研究差异主要有课程设置、发展过程及项目政策推广三方面原因。学习进阶领域未来的研究趋势为构建关注关键能力培养的学习进阶、深化学习进阶的形成性评价实证研究、推进其在教师专业发展中的应用以及构建学科矩阵。

[关键词] 学习进阶, 研究热点, 研究趋势, 国内外比较

[中图分类号] G420 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2025)01-0078-10

Research Review and Analysis of Evolutionary Trends of Learning Progression at Home and Abroad

Zhang Shuya¹, Zhao Yuan²

(1. School of Teacher Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Learning progression has led to the transformation and development of science education in the 21st century, gaining recognition and attention in various disciplinary fields. This article takes the relevant journals on learning progression from CNKI and the Web of Science core database as research samples. Through visual analysis using CiteSpace software, it identifies research hotspots in the field of learning progression both domestically and internationally, analyzes the reasons for differences in research hotspots, and makes predictions about future trends. The study indicates that domestic research on learning progression mainly focuses on core literacy, conceptual development, and teaching practices, while international research primarily centers on different themes of learning progression, breadth expansion, and empirical research. The differences in domestic and international research are mainly attributed to curriculum design, developmental processes, and project policy promotion. The future research trends in the field of learning progression include constructing learning progression that emphasizes key competency cultivation, deepening empirical research on formative assessment of learning progression, advancing its application in teacher professional development and construct disciplinary matrix.

Key words: learning progression, research hotspots, research trends, domestic and international comparison

21 世纪以来, 在科学教育领域兴起了一场构建“少而精(less is more)”的科学课程, 在有限时间内为学生提供充分的学习体验, 达成良好的科学素养(scientific literacy)的革命^[1-2]。对该问题的探索必然会指向一个新的研究方向——学习进阶(learning progressions)。学习进阶最早由美国国家研究委员会“幼儿园至高中科学成就测验的设计”项目组提出, Smith 等将其定义为“学生在学习某一核心概念的过程中, 所遵循的一系列逐渐复杂的思维路径”^[3]。随着各国教育改革的推进, 学习进阶逐渐得到了各学科领域的认可与重视, 如美国全国科学教育标准框架《K-12 科学教育框架: 实践、跨学科概念和学科核心概念》提出以

收稿日期: 2024-01-24.

通讯作者: 赵媛, 教授, 博士生导师, 研究方向: 课程与教学论研究. E-mail: zhaoyuan@njnu.edu.cn

学习进阶方式统整科学教育课程^[4].我国近年来对学习进阶的研究也逐渐展开.为了全面掌握学习进阶研究的热点与未来趋势,本文借助 CiteSpace 软件,深入分析 CNKI 数据库和 WOS 核心数据库中学习进阶的相关期刊文献,旨在为学习进阶的未来研究提供一定的参考与启示.

1 研究方法和数据来源

本文采用文献计量法,利用 CiteSpace6.2 软件进行可视化分析. CiteSpace 是应用 Java 语言开发的一款信息可视化软件,主要基于共引分析理论和寻径网络算法,对特定领域文献(集合)进行计量,以探寻出学科领域演化的关键路径及知识拐点,并通过一系列可视化图谱的绘制来形成对学科演化潜在动力机制的分析和学科发展前沿的探测^[5].

本文的研究数据于 2023 年 11 月分别从 CNKI 数据库及 WOS 核心数据库搜索得到.国内文献数据通过在 CNKI 以“学习进阶”为主题进行检索得到,共获得 490 篇期刊文献,人工筛选后得到 464 篇.国外文献数据通过在 WOS 核心数据库中以“learning progression”or“learning progressions”为主题进行检索,剔除会议等不符合要求文献,经人工筛选共获得 595 篇期刊文献.随后将以上文献导入 CiteSpace 软件,字段依次选择作者、机构、国家和关键词进行定量可视化分析.

2 国内外学习进阶研究概况分析

2.1 发文数量波动上升,国内研究起步晚但发展迅速

学习进阶领域内文献数量随时间的变化能反映该领域大致的发展趋势.如图 1 和图 2 所示,由国内外学习进阶发文数量随时间变化统计图可知,国内外学习进阶领域研究发文数量都呈现波动上升趋势.其中,我国第一篇学习进阶文献出现在 2005 年,国外第一篇文献出现在 2000 年.国内学习进阶发文数量大幅上升的时间段为 2013~2020 年,与国外在一定程度上保持一致.虽然国内学习进阶研究起步略晚,但近年来在累计发文数量上大致与国外追平,说明近年来国内对学习进阶方面的研究关注度较高,发展迅速.

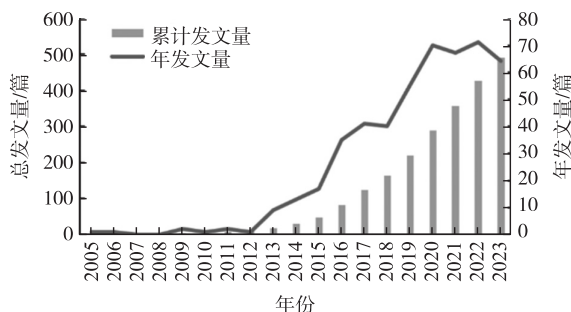


图 1 国内学习进阶领域发文量统计

Fig. 1 Statistics on the number of publications in learning progression in China

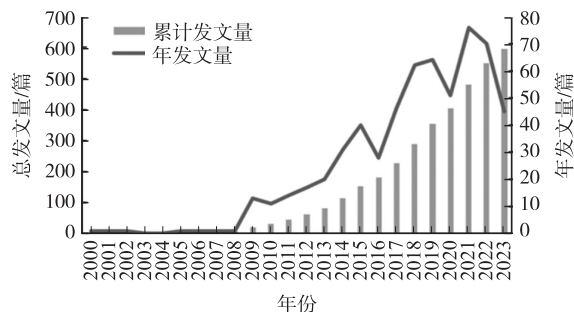


图 2 国外学习进阶领域发文量统计

Fig. 2 Statistics on the number of publications in learning progression abroad

2.2 作者数量庞大,以大学为主要研究机构,研究地区集中

国内学习进阶领域发文量最多的是郭玉英(16 篇),其次是姚建欣(8 篇)和张静(7 篇).从作者合作的角度看,学习进阶研究作者之间虽有合作,但仍较为分散.国外学习进阶领域发文量最多的是 Anderson C W、Jin H 和 Wilson M(10 篇),其次是 Neumann K(8 篇),研究内容多为物质(matter)的学习进阶的构建以及测量评估.从作者合作的角度看,国外学习进阶领域作者之间的合作总体上同样不够紧密,但出现多个比较大的多人团队.

国内外学习进阶研究机构都以大学为主,国内发文量最多的是北京师范大学物理学系(22 篇),中心性为 0.03;国外发文量最多的是 Michigan State University(55 篇),且具有很高的中心性(0.28),体现其在学习进阶研究中所占据的重要地位.

就国家而言,学习进阶领域研究呈现以美国为核心的单核结构.美国发文量最多(377 篇)且中心性极高(0.61),是学习进阶领域的领头羊.中国虽然发文数量排名第三,但中心度较低(0.11),说明我国在学习进阶领域需要加强国际合作.

3 国内外学习进阶研究热点分析

3.1 关键词共现图谱分析

关键词的共现分析可以明确该领域研究热点及重要研究成果. 本文通过 CiteSpace 软件对学习进阶领域关键词进行共现网络分析, 得到共现图谱如图 3、图 4 所示. 在共现图谱中, 节点的大小代表出现次数, 节点内颜色的厚薄度表示不同时间段的出现频次, 出现紫色最外圈说明该关键词中心性大, 节点之间的连线表现共现关系.

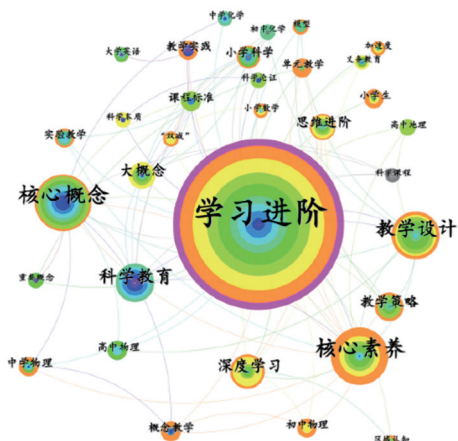


图3 国内相关文献关键词共现图谱

Fig. 3 Keyword co-occurrence map in related Chinese literature

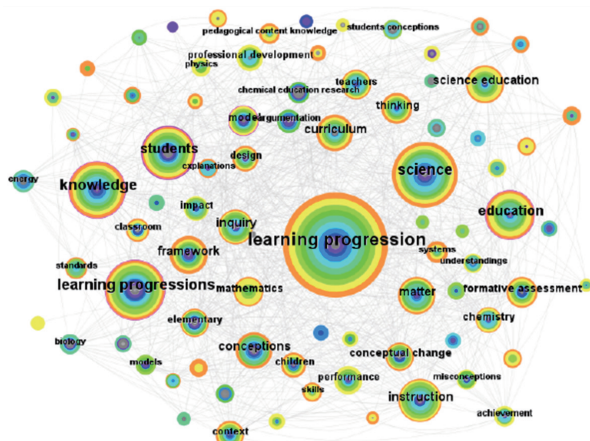


图4 国外相关文献关键词共现图谱

Fig. 4 Keyword co-occurrence map in related foreign literature

国内学习进阶关键词共现频次前 10 名如表 1 所示. 从图 3 中可知,“概念教学”“中学物理”“教学实践”“模型”“思维进阶”虽然在图谱中直径较小,但这些关键词出现红色最外圈,说明其近年来关注量激增,是该领域新的研究热点.

国外学习进阶关键词共现频次前 10 名如表 2 所示。从图 4 中可知,“systems”“pedagogical content knowledge”“beliefs”“skills”“children”等虽然在图谱中直径较小,但这些关键词同样出现红色最外圈,是该领域新的研究热点。其次,“learning progressions”“students”“knowledge”“model”“education”等关键词中心性大,即该关键词在网络中影响大,值得关注。

对比国内外关键词共现结果可以发现,国内外研究关键词基本相似,但国内研究关键词更少更分散,关键词之间联系更弱。

表1 国内相关文献关键词共现频次(前10名)

Table 1 The top 10 keyword co-occurrence frequencies in related Chinese literature

序号	关键词	次数	中心度	年份
1	学习进阶	294	1.27	2012
2	核心素养	41	0.06	2016
3	核心概念	41	0.03	2014
4	教学设计	30	0.05	2015
5	科学教育	20	0	2013
6	深度学习	14	0.04	2019
7	大概念	12	0	2013
8	教学策略	10	0.03	2017
9	思维进阶	9	0.06	2017
10	小学科学	6	0	2014

表2 国外相关文献关键词共现频次(前10名)

Table 2 The top 10 keyword co-occurrence frequencies in related foreign literature

序号	关键词	次数	中心度	年份
1	learning progression	290	0.08	2010
2	science	117	0.09	2012
3	knowledge	101	0.12	2009
4	learning progressions	92	0.17	2006
5	students	76	0.22	2009
6	education	66	0.16	2008
7	instruction	53	0.09	2011
8	curriculum	40	0.06	2009
9	science education	39	0.06	2006
10	framework	39	0.07	2012

3.2 关键词时间线图谱分析

关键词时间线图谱可以呈现关键词聚类,并勾画出各聚类之间的关系以及某个聚类中文献的历史跨度。为了更准确地呈现学习进阶领域的研究热点及发展进程,运用 CiteSpace 软件进行关键词时间图谱分

析,得到国内外学习进阶前十大关键词聚类的时间线图谱,如图 5、图 6 所示。

国内学习进阶领域前十大关键词聚类分别为“学习进阶”“核心素养”“核心概念”“教学设计”“大概概念”“教学策略”“网络走班”“源起”“大观念”和“小组学习”。国外学习进阶领域前十大关键词聚类为“conceptual change”“learning path”“learning progressions”“early childhood”“science education”“assessment literacy”“biology”“first-year undergraduate/general”“decision making”和“conceptual understanding”。

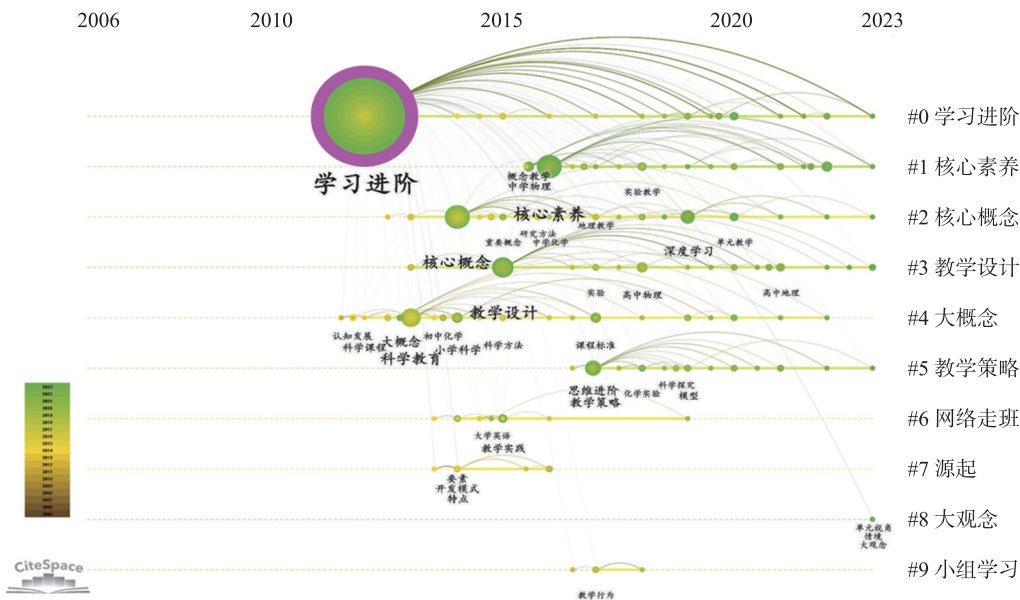


图 5 国内相关文献聚类时间线图谱
Fig. 5 Clustering timeline map in related Chinese literature

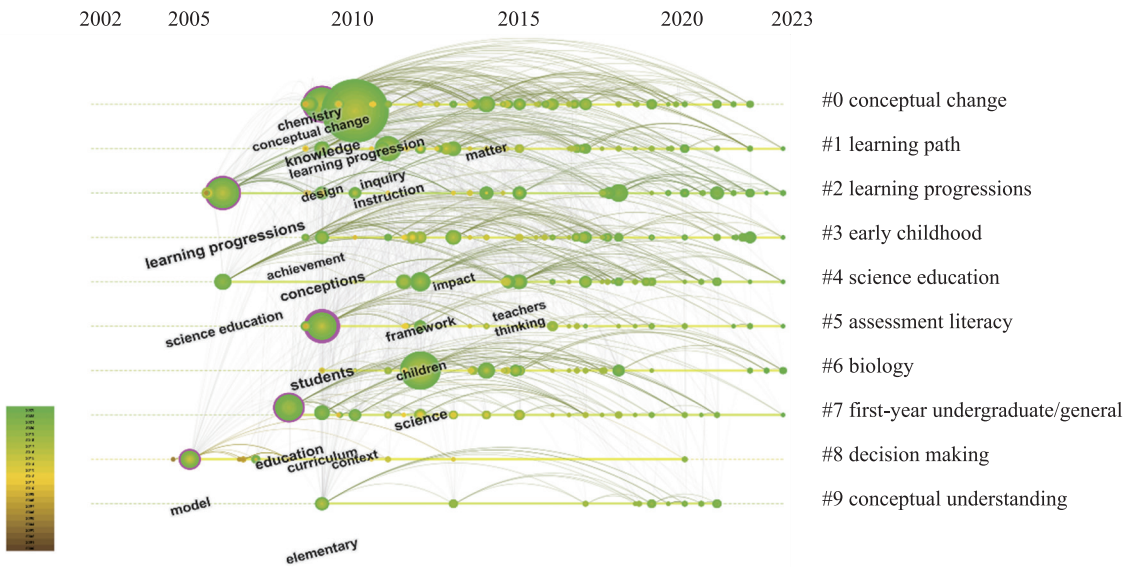


图 6 国外相关文献聚类时间线图谱
Fig. 6 Clustering timeline map in related foreign literature

3.3 关键词研究热点分析

3.3.1 国内外研究热点

通过整理关键词共现图谱及聚类时间线发展图谱,可知国内学习进阶研究热点为:①关于核心素养的学习进阶,即指向各学科领域核心素养的学习进阶构建;②关于概念构建的学习进阶,主要包括围绕核心概念、大概概念及大观念的学习进阶;③基于学习进阶的教学实践策略,主要包括教学设计、教学实践、小组学习,一般以具体教学案例的方式集中出现在高中物理、高中化学和高中地理教学中。

同理,国外学习进阶研究热点可归纳总结为:①学习进阶不同主题研究,以科学教育为主要对象,主要

分为关于知识本体的学习进阶及关注关键能力发展如科学建模以及科学论证能力的学习进阶;②学习进阶广度拓展研究,在纵向学段尺度上,国外学习进阶研究涵盖了从幼年、小学、中学到本科及研究生阶段。横向学科尺度上不仅包括生物、化学、物理等学科内容,还包括物质科学、遗传科学、社会生态系统等内容的学习进阶构建。构建对象也跨度到教师这一主体;③学习进阶有效性实证研究,主要包括素养评估和高阶思维的评价。

3.3.2 国内外研究热点对比及原因分析

通过对比可以发现,国内学习进阶研究相比于国外学习进阶研究在研究的深度和广度上有所欠缺且缺少实证研究。

首先,在学科尺度上,国内研究主要以初中或高中阶段的物理(24篇)、化学(12篇)、地理(16篇)为主,大多关注如何将学习进阶运用在单个学科的概念构建或核心素养培养上,如国内学习进阶领头羊的北京师范大学郭玉英团队早期关注整合的科学课程改革,但主要是基于学习进阶的物理概念建模、物理核心素养的教学设计等研究,近年来虽发表了部分关于概念学习和科学论证能力的学习进阶的文章,但相比于国外关于科学建模^[6]、物质科学^[7-8]等领域的学习进阶构建仍欠缺一定的深度和广度。其次,国内学习进阶研究大多集中在单个学段,如小学、初中或高中,相比于国外学习进阶研究缺乏时间尺度跨度长的持续性研究。

同时,国内研究大多集中在对学习进阶的理论构建,如概念进阶、论证进阶的构建,以及基于学习进阶的教学设计等,都是从理论层面入手构建学习的“阶”,缺乏实证验证;或大多只是简单地通过试题进行评价,如高佳利等^[9]关于核心概念学习进阶的实证研究、王钢等^[10]以前后测的形式进行关于核心素养进阶的实证等。而国外关于学习进阶的实证研究近年来更多关注如何对学生的高阶思维或素养培养的有效性评价,如以表现性任务形成性评价^[11-12]等确定学习进阶的信效度。

究其原因,有如下三点:

(1)课程设置:以美国为例,美国早在20世纪末就实行了整合的科学课程,其《K-12科学教育框架:实践、跨学科概念和学科核心概念》以及《新一代科学教育标准》特别重视科学与工程实践行为,并提出用学习进阶统整整个K-12年级的科学教育课程,实现纵向学段尺度及横向学科尺度更大范围更深层次的整合。而我国的基础教育没有整体的课程设置,缺少全学段科学领域统领式的课程标准(小学除外),所以在横向上大多为单一学科核心素养培养的学习进阶构建。其次,我国不同学段的课程之间也存在内在的逻辑脱节,所以学习进阶研究时间跨度短。

(2)发展过程:国外学习进阶起源于对物质^[3,13]和进化^[14]本质的研究,积累了大量的理论与实证研究成果,衍生到后期发展为对于概念理解、科学建模、科学论证能力培养的关注。我国学习进阶研究早期照搬国外研究成果,对于其理论起源与内涵理解较浅。

(3)项目政策推广:以美国为例,学习进阶最早由国家研究委员会(NRC)“幼儿园至高中科学成就测验的设计”这一项目所关注,后续通过《K-12科学教育框架:实践、跨学科概念和学科核心概念》《新一代科学教育标准》等文件逐步推进。我国则大多是教师学者们的自发研究,自然在研究的纵向和横向广度上有所欠缺,且在实证研究开展方面也存在较多困难。

4 国内外学习进阶研究趋势分析

突现关键词是指在较短时间内出现较多或使用频率较高的词,往往成为日后的研究热点,引导学科发展^[15]。其中,“Year”为该关键词最初出现的年份,“Strength”为突现强度,“Begin”和“End”为该关键词出现突现趋势的起止时间。通过CiteSpace软件得到国内外学习进阶关键词突现图谱如图7、图8所示。从图中可以看出,我国近年来学习进阶领域突现词大多集中在2013~2019年,如“科学教育”“核心概念”等。但近年来突现词较少,缺少对未来研究具有影响力的关键词。而通过对国外学习进阶领域的关键词突现分析可以发现,“physics”“mathematics”“validiy”“pedagogical content knowledge”“skills”均从2020年前后保持强势,并将在未来一段时间对学习进阶领域施加影响。“conceptual change”“conceptual understanding”“students understandings”在突现期后期被迭代或废弃,总体呈现从“知识”过渡到“能力”的热点转换。

结合关键词热点分析及突现分析,可以对学习进阶领域未来热点进行如下预测:

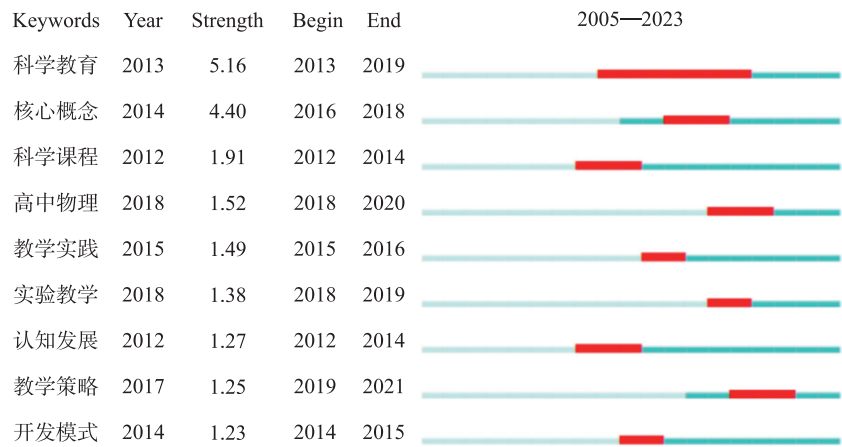


图 7 国内相关文献关键词突现 top9

Fig. 7 The top 9 emerging keywords in related Chinese literature

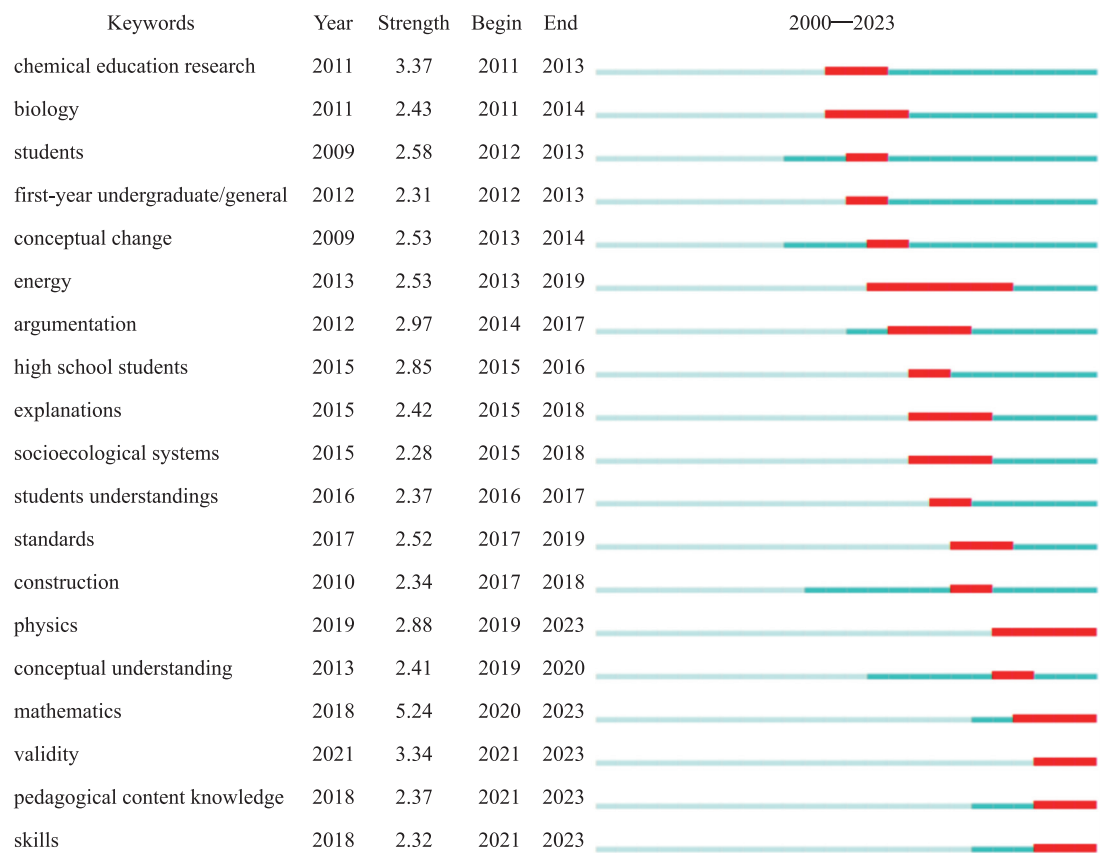


图 8 国外相关文献关键词突现 top19

Fig. 8 The top 19 emerging keywords in related foreign literature

4.1 构建关注关键能力培养的学习进阶

学习进阶方面的研究通常关注如何围绕科学领域的核心问题构建学生的认知体系,即关注学生在知识认知层面的发展进程. 尽管开发以概念领域为重点的学习进阶很有价值,但“take science to school”所表达的目标是发展认知和社会科学实践^[16]. 所以随着科学教育改革的逐步推进,学习进阶研究增加了对关键能力的培养的关注,如 Osborne 等^[17]关于科学论证的三维学习进阶构建, Songer 等^[18]提出的科学解释进阶以及 Schwarz 等^[6]提出的有意义可操作的关于科学建模的学习进阶等,关于科学论证、科学建模、科学解释进阶的后续研究逐渐成为学习进阶研究的主流.

随着将学习评估转向学习表现,学术界逐渐达成在将知识的运用置于一个或多个科学推理实践的背

景中的共识^[16]。美国国家研究理事会提出,整合式教学在促进学生理解学科知识领域、发展科学推理、帮助学生读写以及培养科学兴趣方面比传统实验教学更为有效^[19],整合式进阶也成为学习进阶研究的主要的研究热点。在整合式进阶研究中,已有诸多学者进行了有意义的实践尝试:Lehrer等^[20]将学生置身于通过建模和表征提供解释力量以解决感兴趣问题的情境中,通过这种方式,将核心概念与建模和表征的可行实践整合在一起;Songer等^[18]将生物多样性内容进阶与推理探究进阶并列,以内容教学为重点,实践的进阶作为一条假设的路径贯穿生物多样性教学单元;Mohan等^[21]以环境科学素养为关联要素,实现碳循环和水循环的概念进阶与科学实践进阶的整合。就理论框架研究方面,部分学者认为整合式进阶基于认知支架理论^[22],从早期核心概念与关键能力的整合,到科学模型与论证的整合,并提出科学谈判教学法(science negotiation pedagogy)^[23]。国内整合式进阶研究主要以弭乐等^[24-25]关于概念学习与科学论证整合学习进阶的研究为主。本文认为未来学习进阶的研究热点应逐渐转变为多变量整合式进阶,从而实现“少而精”的课程目标。

4.2 深化学习进阶的形成性评价实证研究

学习进阶是制定和获得评估课程和教学模式对学生的学习和成绩影响衡量标准和证据的可行方法^[16]。美国的《不让一个孩子掉队法案》提出的政策建议包括实现课程、教学和评估(C-I-A)协调一致,这个建议的提出源于形成性评价在促进学生学习方面的作用。形成性评价的主要作用是对学习进行监测,为教学实践和教师决策提供信息,这通常被称为“适应性教学”^[26]和“保持学习在正轨”。具体就进阶而言,学生从低级锚点到高级锚点的进阶过程需要通过形成性评价连贯地监测其学习观念与实践情况的变化情况,从而起到推进作用^[16]。

Yin等^[12]考察了与学习进阶相一致的嵌入式形成性评价对初中科学概念变化和成绩的影响,并得出嵌入式的形成性评价有利于学生科学概念学习进阶的构建。Furtak等^[27]和Anderson等^[28]得出基于形成性评价的学习进阶有利于科学素养的形成。Carraher等^[29]提出使用学习进阶进行形成性评价不仅强调每个水平的末端,而且要在每个水平阶段的中间理解状态中,频繁地评估学生的进展情况。但同时,部分学者也提出正式的形成性评估可能不足以观察课堂上科学学习和知识构建的复杂性^[30],这是学习进阶领域形成性评价研究今后需要着力解决的问题,即需要通过实证研究确定形成性评估在推动学习进阶上的粒径和时间尺度阈值。

其次,基于学习进阶的形成性评价系统的构建也将成为学习进阶领域未来的研究方向,如Choi等^[31]基于计算机化自适应测试(CAT)的人工智能方法和贝叶斯网络作为学习分析方法,开发一种自适应形成性评价系统。

4.3 推进学习进阶在教师专业发展中的应用

在理解和阐明学习进阶发展路径方面,确定学习进阶的中间步骤或水平非常重要^[16]。Smith等^[3]将中间层次称为“垫脚石”,他们认为教师需要通过适当的教学干预,让学生成功地在较低和较高的锚点之间架起桥梁,即教学干预和教学辅助在学习进阶中非常重要。而对于学生细微思想变化的解读是教学干预或教学辅助过程中的重点,这对教师在内容知识、教学内容知识以及心理学知识上都提出了非常高的要求。但教师之间能力的差距很大程度影响了学习进阶的构建^[26-28]。

同时研究人员发现学习进阶不仅可以用于学生科学素养的培养,同样可以作为促进教师专业发展的方法。Gunckel等^[32]以生态环境中的水为主题,探讨了基于学习进阶的课程材料在支持教师发展更复杂的内容知识(CK)和教学内容知识(PCK)中的作用,并得出学习进阶具有支持教师学习的潜力。Aufschnaiter等^[33]通过对物理职前教师的测试,认为学习进阶有利于教师对学生思维的分析,并推荐在职前教育中利用学习进阶。

简而言之,学习进阶有利于教师更好地理解学生的想法、设计适当的学习目标以及支持学生发展更复杂想法的教学步骤,未来的研究可能更关注学习进阶在教师专业发展中的应用,为教师的专业发展提供科学的路径。

4.4 构建学习进阶的学科矩阵

学习进阶的提出源于美国国家倡议与报告,“take science to school”把学习进阶定义为:“学习进阶是指儿童在学习和探究某一主题的过程中,在较宽的时间跨度内(如六个月或更长的时间),对某一主题进

行连续的、更复杂的思考。”这个定义经常遗漏的一句话是:“要实现这些目标,关键在于教学实践。”也就是说学习进阶既是描述又是工具。

仔细回顾学习进阶研究的发展历程,可以发现存在各种各样的理论和方法。就理论基础而言,基础领域有 Didaktiks、行为主义、认知心理学和发展心理学、建构主义、心智理论和元认知发展、概念变革、教学法和学习轨迹研究等。遗憾的是,许多假设性的学习进阶来自既定的学科教学框架^[34]、标准文件审查^[35-36]、课程框架^[37-38]等,缺乏理论方面的阐述。同时,丰富的理论基础为学习进阶研究提供充分的理论源泉和扎实的研究基础的同时,也导致学习进阶的描述缺乏共性^[16]。这一方面也是由于学习评估策略、测量框架的多样性导致的,学习进阶描述与学习评估策略和测量框架息息相关。

就学习进阶的学习评估策略而言,有 Talanquer^[39]提出的认知限制描述、Lee 等^[40]提出的知识整合环境学习视角评估,其中比较突出的是 Wilson^[41-42]提出的 BEAR 伯克利评估模型。就测量设计框架而言, Wilson 提出了一个用于确定水平表现的框架^[43],在同一年 Shin 等^[44]推进了以建构为中心的学习进阶设计框架,此外 Stevens 还提出了一个基于分类学的框架^[45],Salinas 提出了逐级进展法和全景图发两种可供选择的教学设计框架^[46],Rupp 也早在 2009 年就提出以贝叶斯网工作分析来进行学习进阶设计^[47]。

托马斯-库恩认为科学家群体应就领域内的符号概括、模型、价值观和典范达成共识,构建“学科矩阵”(disciplinary matrix)。未来学习进阶研究要想取得进展,本文认为研究界须致力于解决建立学习进阶的学科矩阵,在理论研究及实践方法上确定基本框架,从而解决学习进阶研究缺乏共性的问题。

5 结论

国内外学习进阶研究由于课程设置、发展过程及项目政策推广三方面原因造成在关注点和研究热点上存在差异。随着科学教育改革的逐步推进,学习进阶研究将更加注重关键能力的培养,形成性评价的实证研究将得到深化,教师专业发展中的应用将得到推进。同时,构建学习进阶的学科矩阵将成为解决研究缺乏共性问题的关键。

[参考文献] (References)

- [1] FRATT L. Less is more: Trimming the overstuffed curriculum[J]. District Administrator, 2002, 38(3): 56-60.
- [2] 美国科学促进协会. 美国科学素养的基准[M]. 中国科学技术协会, 译. 北京: 科学普及出版社, 2001.
- [3] SMITH C, WISER M, ANDERSON C W, et al. Implications of research on children's learning for assessment: Matter and atomic molecular theory[J]. Measurement: Interdisciplinary Research and Perspective, 2006, 4(1/2): 1-98.
- [4] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concept, and Core Idea[EB/OL]. [2024-01-24]. https://www.bowdoin.edu/childrens-center/pdf/A_Framework_for_k12_science.pdf.
- [5] 陈超美, 陈悦, 侯剑华, 等. CiteSpace II: 科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J]. 情报学报, 2009, 28(3): 401-421.
- [6] SCHWARZ C V, REISER B J, DAVIS E A, et al. Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2009, 46(6): 632-654.
- [7] NEUMANN K, VIERING T, BOONE W J, et al. Towards a learning progression of energy[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2013, 50(2): 162-188.
- [8] STEVENS S Y, DELGADO C, KRAJCIK J S. Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2010, 47(6): 687-715.
- [9] 高佳利, 张静, 李小青. 核心概念学习进阶的理论建构及实证研究——以“几何光学”为例[J]. 天津师范大学学报(基础教育版), 2017, 18(3): 60-64.
- [10] 王钢, 玛丽娜·阿西木汗, 郭玉英. 基于核心素养学习进阶的“楞次定律”教学改进实证研究[J]. 物理教师, 2017, 38(12): 16-20.
- [11] COOPER M, KLYMKOWSKY M. Chemistry, life, the universe, and everything: A new approach to general chemistry, and a model for curriculum reform[J]. Journal of Chemical Education, 2013, 90(9): 1116-1122.
- [12] YIN Y, TOMITA M K, SHAVELSON R J. Using formal embedded formative assessments aligned with a short-term learning progression to promote conceptual change and achievement in science[J]. International Journal of Science Education, 2014,

- 36(4):531-552.
- [13] SMITH C L, WISER M, ANDERSON C W, et al. Implications of research on children's learning for standards and assessment: A proposed learning progression for matter and the Atomic-Molecular theory[J]. *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives*, 2006, 4(1/2): 1-98.
- [14] CATLEY K, LEHRER R, REISER B. Tracing a prospective learning progression for developing understanding of evolution[R]. Washington DC, USA: National Academy of Sciences, 2005.
- [15] 秦瑜, 姜帅, 王彩连. 基于 CiteSpace 的中学地理教师专业发展研究综述与演进趋势分析[J]. *地理教学*, 2023(19): 9-13.
- [16] DUSCHL R, MAENG S, SEZEN A. Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis[J]. *Studies in Science Education*, 2011, 47(2): 123-182.
- [17] OSBORNE J F, HENDERSON J B, MACPHERSON A, et al. The development and validation of a learning progression for argumentation in science[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2016, 53(6): 821-846.
- [18] SONGER N B, KELCEY B, GOTWALS A W. How and when does complex reasoning occur? Empirically driven development of a learning progression focused on complex reasoning about biodiversity[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2009, 46(6): 610-631.
- [19] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K-8[M]. Washington DC, USA: The National Academies Press, 2007.
- [20] LEHRER R, SCHAUBLE L. Modeling natural variation through distribution[J]. *American Educational Research Journal*, 2004, 41(3): 635-679.
- [21] MOHAN L, CHEN J, ANDERSON C W. Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2009, 46(6): 675-698.
- [22] REISER B J. Scaffolding complex learning: The mechanisms of structuring and problematizing student work[J]. *Journal of the Learning Sciences*, 2004, 13(3): 273-304.
- [23] CHEN Y C, BENUS M J, YARKER M B. Using models to support argumentation in the science classroom[J]. *The American Biology Teacher*, 2016, 78(7): 549-559.
- [24] 弭乐, 郭玉英. 概念学习进阶与科学论证整合的教学设计研究[J]. *课程·教材·教法*, 2018, 38(5): 90-98.
- [25] 弭乐, 郭玉英. 基于整合的进阶式教学设计研究: 以概念进阶与论证进阶为例[J]. *物理教师*, 2021, 42(1): 2-7.
- [26] CORCORAN T, SILANDER M. Instruction in high schools: The evidence and the challenge[J]. *The Future of Children*, 2009, 19(1): 157-183.
- [27] FURTAK E M, HEREDIA S C. Exploring the influence of learning progressions in two teacher communities[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2014, 51(8): 982-1020.
- [28] ANDERSON C W, DE LOS SANTOS E X, BODBYL S, et al. Designing educational systems to support enactment of the next generation science standards[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2018, 55(7): 1026-1052.
- [29] CARRAHER D W, SMITH C L, WISER M, et al. Assessing students' evolving understandings about matter[C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science(LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.
- [30] BELL B, COWIE B. Formative Assessment and Science Education[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [31] CHOI Y, MCCLENEN C. Development of adaptive formative assessment system using computerized adaptive testing and dynamic Bayesian networks[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22): 8196.
- [32] GUNCKEL K L, COVITT B A, SALINAS I. Learning progressions as tools for supporting teacher content knowledge and pedagogical content knowledge about water in environmental systems[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2018, 55(9): 1339-1362.
- [33] VON AUFSCHNAITER C, ALONZO A C. Foundations of formative assessment: Introducing a learning progression to guide preservice physics teachers' video-based interpretation of student thinking[J]. *Applied Measurement in Education*, 2018, 31(2): 113-127.
- [34] DUNCAN R G, ROGAT A D, YARDEN A. A learning progression for deepening students' understandings of modern genetics across the 5th-10th grades[J]. *Journal of Research in Science Teaching*, 2009, 46(6): 655-674.
- [35] ALONZO A C, STEEDLE J T. Developing and assessing a force and motion learning progression[J]. *Science Education*, 2009, 93(3): 389-421.

-
- [36] STEEDLE J T, SHAVELSON R J. Supporting valid interpretations of learning progression level diagnoses [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2009, 46(6): 699–715.
- [37] ROSEMAN J E, CALDWELL A, GOGOS A, et al. Mapping a coherent learning progression for the molecular basis of heredity [C]//Proceedings of the 2006 National Association for Research in Science Teaching Annual Meeting. San Francisco, USA: NARST, 2006.
- [38] SALINAS I. Learning progressions in science education: Two approaches for development [C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.
- [39] TALANQUER V. On cognitive constraints and learning progressions: The case of “structure of matter” [J]. International Journal of Science Education, 2009, 31(15): 2123–2136.
- [40] LEE H S, LIU O L. Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades: The knowledge integration perspective [J]. Science Education, 2010, 94(4): 665–688.
- [41] WILSON M. Constructing Measures: An Item Response Modeling Approach [M]. New York, USA: Routledge, 2004.
- [42] WILSON M. The structured constructs models (SCM): A family of statistical models related to learning progressions [C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.
- [43] WILSON M. Measuring progressions: Assessment structures underlying a learning progression [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2009, 46(6): 716–730.
- [44] SHIN N, STEVENS S Y, SHORT H, et al. Learning progressions to support coherence curricula in instructional material, instruction, and assessment design [C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.
- [45] STEVENS S Y, SHIN N, KRAJCIK J S. Towards a model for the development of an empirically tested learning progression [C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.
- [46] SALINAS I. Learning progressions in science education: Two approaches for development [C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.
- [47] RUPP A A, CHOI Y, GUSHTA M, et al. Modeling learning progressions in epistemic games with epistemic network analysis: Principles for data analysis and generation [C]//Proceedings of the 2009 Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference. Iowa City, USA: LeaPS, 2009.

[责任编辑: 严海琳]