

自然科学博物馆科学解释的有效路径探究

郭美廷

(南开大学历史学院, 天津 300071)

[摘要] 科学解释是自然科学博物馆发挥社会教育职能的重要环节之一。自然科学博物馆因其丰富的实物资源、多样化的展览和教育活动而具有科学解释的优势,然而,当前也存在解释目标定位模糊、解释逻辑欠完整、解释落点欠包容等问题。文章以博物馆情景学习模型为理论框架,结合了认知科学领域的概念隐喻理论和科学哲学领域的解释模型,分别从个人、环境和社会文化三个层次提出了解决方案:第一,前置调研观众的基础认知,科学预判其推理模式,合理设计其再认识架构,以满足目标群体的需求;第二,使用概念隐喻建立基础要素架构、使用解释模型完善科学解释过程,以搭建完整的解释链;第三,使用对话模式、传递共性价值观,构建多元性解释落点,以实现双向的沟通与交流。最终,形成闭环结构的科学解释模式与效能评估过程,推动我国自然科学博物馆成为向公众传递科学知识、宣传科学精神的重要场所。

[关键词] 自然科学博物馆 科学解释 情景学习模型 概念隐喻 解释模型

[中图分类号] N4; G260 **[文献标识码]** A **[DOI]** 10.19293/j.cnki.1673-8357.2023.03.010

科学素质是社会文明进步的基础。优化科学教育资源供给,是提升公民科学素质、推动我国科普事业高质量发展的重要路径。《全民科学素质行动规划纲要(2021—2035年)》强调应“推动科技馆与博物馆、文化馆等融合共享,构建服务科学文化素质提升的现代科技馆体系”^[1]。自然科学博物馆依托于丰富的实物资源、多样化的展览和教育活动,内容涵盖广泛,包括天文、海洋科学、地质、生物、地理等^[2-3],对于提升公民科学素质具有重要意义。所以,向社会公众普及科学理论知识与科学方法、宣传和弘扬科学精神,是自然科学博物馆发挥社会教育职能

的重要目标。

科学解释(Scientific Explanation)是指对科学现象的描述、预测,以及原因陈述^[4]。在自然科学博物馆语境中,科学解释是进行科学教育的关键环节,是指借助实物资源、互动展项、教育活动等方式,推动观众建构科学知识,引导观众形成规范正确的科学思想的过程^[5]。然而,在这类非正式教育环境中,观众的需求多元性、环境空间的自由选择性、对话的复杂性等因素,为博物馆进行有效的科学解释带来了一定难度,造成了解释目标模糊、解释逻辑欠完整、解释落点欠包容等一系列问题。为了解决这些问题,本

收稿日期:2022-11-19

基金项目:2022年天津市研究生科研创新项目“智慧博物馆建设的实现模式与技术路径”(2022BKY051)。

作者简介:郭美廷,南开大学历史学院博士研究生,研究方向:博物馆学,E-mail:1120220900@mail.nankai.edu.cn。

文以情景学习模型为理论框架，结合概念隐喻理论及解释模型，从个人、环境、社会文化三个层次提出了博物馆科学解释的有效路径。该路径有利于为博物馆科学解释实践提供依据，从而提升博物馆的科普服务能力，推动我国建设高质量的科普服务体系。

1 研究综述与理论框架

科学哲学对科学解释的概念进行了界定，并形成了影响深远的科学解释模型。在此领域中，科学解释被视为从宏观的视域，对原理或规律进行本质意义的分析，对多元的科学概念进行考察和比较^[6]。詹姆斯·伍德沃（James Woodward）将科学解释的概念进行了两个关键的比较，一是区分了科学特有的解释和非科学特有的解释（如日常生活相关的解释），二是比较了科学内部的“解释”和“非解释”（如描述、推理等）^[7]。在此基础上，科学哲学家们归纳了多种模型，来解释和预测自然现象，例如定律覆盖模型、因果解释模型、统一模型、实用主义模型等^[8-9]。

科学教育领域在科学哲学的基础上，结合教学目标，探究了适合学生认知水平、符合教学情境的科学解释模式^[10]。例如主张一证据—推理的教学方法（Claim—Evidence—Reason, CER）^[11-14]、前提—推理—结果的教学策略（Premise—Reasoning—Outcome, PRO）^[15]。此外，还提出了以提升学生认知为导向的科学解释评价标准。例如将实证效度、解释能力、普遍性作为评估解释质量的三项指标^[16]；在因果解释模型和统一模型范畴内，将相关性、概念框架、因果关系和适当的表现水平四项作为好的科学解释的特征^[17]。

在博物馆语境中，科学解释的研究具有一定的复杂性和分散性，需要引入理论框架进行分类与梳理。所以本文将约翰·福尔克（John Falk）的情景学习模型作为理论框

架^[18-21]，对博物馆科学解释的研究现状、现存问题和解决方案进行阐述。情景学习模型是博物馆领域最具有代表性的理论框架之一，其将博物馆学习视为一种情景驱动下的对话，观众在博物馆中生成的科学解释是个人、环境和社会文化三种情景之间相互作用的产物（见图1），目前博物馆从三种情景出发探索了多种方法与路径，以提高科学解释的效果。

在个人情景层面，博物馆根据观众特征的研究，来构建科学解释的触发路径。例如，针对儿童观众群体，博物馆采用问题引导的方式，促进其生成类比解释^[22]。或是设计与儿童的先验知识存在差异的展示内容，使其触发因果解释^[23]。

在环境情景层面，博物馆通过对实物资源与展览叙事的研究，以优化科学解释的成效。“物”是“人类及环境发展的见证物，是理性知识的源头和验证”^[24]，也是博物馆科学解释的核心资源。真实的标本有利于观众在兴趣的驱动下深化对科学概念的理解^[25-26]。博物馆通过恰当的展览主题与叙事，能够引导观众关注国际热点议题与在地化议题^[27]，推动观众对疾病、药物等健康知识的科学认识^[28]，使科学原理与生活实践建立了联系。

在社会文化情景层面，博物馆通过开展教育活动、观察社群对话，研究观众科学解

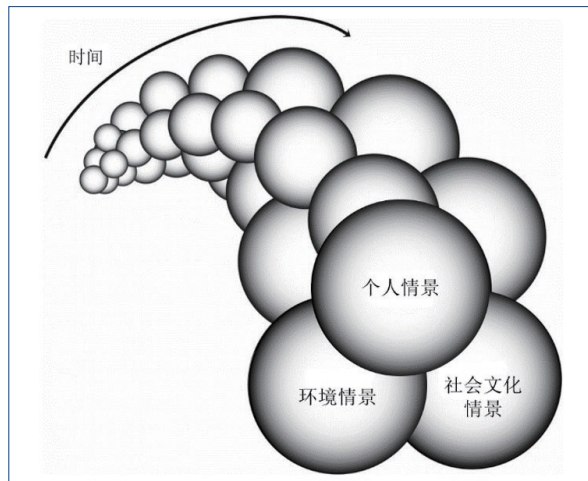


图1 情景学习模型^[19]

释的过程。一方面,博物馆将戏剧、表演、舞蹈、即兴创作等教育活动作为科学教育的辅助手段,唤起观众对自然科学的兴趣与好奇心^[29];另一方面,博物馆通过观察、参与观众对话,不断优化与社会公众的对话模式,例如在家庭对话中,儿童既会受到父母解释模式的影响^[30],又会因博物馆展示内容与教育方式,而激活不同的解释模式^[31],所以博物馆会采取灵活的对话策略以优化其科学解释模式。

2 博物馆科学解释的现存问题

博物馆虽然依托于丰富的实物资源,策划了多样化的展览和教育活动,在科学解释方面展现出了独特的优势,但在个人、环境、社会文化三个层次上,其科学解释的模式仍有较大的提升空间,具体表现为目标定位模糊性、逻辑欠完整性、落点欠包容性。

2.1 个人: 目标定位模糊性

博物馆对科学解释的目标定位存在一定的模糊性。我国教育部、国家文物局发布了《关于利用博物馆资源开展中小学教育教学的意见》,该意见强调通过馆校合作、师资联合培养等方式,促进博物馆与学校教学、综合实践有机结合。但未能精准界定博物馆科学教育的特殊性,以及其与正式教育之间的差异与边界。在国际上,尽管科学解释的概念在美国、英国、澳大利亚、西班牙等国家的科学课程文献中被广泛提及,但是也未对科学解释进行方法与功能上的目标界定^[4];而在此基础上建构的非正式教育环境的学习框架(Strands of Science Learning)^[5],对科学解释的界定则表现出更为明显的模糊性。所以,科学解释目标定位的模糊性是国内外普遍存在的问题。这一问题导致了博物馆在贯彻落实政策时,大多依照科学理论的固有逻辑来设计展览与教育活动,在一定程度上忽视了

观众的解释需求与困难,导致观众对进化论等耳熟能详的经典理论依然存在认识不足、理解偏差等问题^[32]。最终,未能达到博物馆所预期的科学解释效果。

2.2 环境: 逻辑欠完整性

在博物馆环境情景中,科学解释往往是具体的、局部的、不完整的。目前大多数博物馆无论是通过展品展示,还是教育活动解说,都难以实现逻辑链的完整展示,导致观众无法理解透彻相关知识,更难以引发深层次的对话和思考。例如在国外某博物馆“光分解后不能进一步分解”(Light Decomposed Does Not Decompose Further)的展项设计中^[33],博物馆说明牌和讲解员的讲解仅聚焦于“可见光谱”和“单色光透过第二棱镜不分解”两种现象的描述,却忽视了对科学本质的关注——牛顿对白光特性的研究、“微粒说”与“波动说”的学术争议、“波粒二象性”的统一,错过了对科学解释进行深化的良机。实际上,囿于博物馆展品的碎片化属性、易忽视实物组合的“奇点”特质^[24],以及讲解人员专业知识储备不足等因素,博物馆的科学解释类型、深度大都会受到不同程度的限制,阻碍了科学解释逻辑链的完整性、透彻性表达。

2.3 社会文化: 落点欠包容性

“努力改变公众固有观念中陈旧的、与现代社会认知不相适应的内容”^[34],诚然是博物馆能动性与社会意义所在,但这也易使博物馆陷入仅关注科研成果以及科学理论的解释,而忽视多元性观点解读与科学精神升华的困境之中。一方面,在多元性观点的解读上,国外自然科学博物馆已经进行了较大规模的实践。例如通过开放式的互动展览,邀请观众参与设计和揭示科学现象^[35],从而传播正确的科学思想,促进观众认识到科学解释是一个长期、复杂的过程,每个实验不一定都能够得到可理解的结果^[36]。然而我国尚处于

起步阶段，较少的自然科学博物馆开设实验性的方法与观众进行对话，大多博物馆将自身定位为自上而下、单向输出科学观点的场所，缺乏鼓励观众表达观点的意识。另一方面，在科学精神的升华上，我国博物馆仍有较大的发展空间。尽管我国在政策层面强调了科普场馆在弘扬科学精神和科学家精神方面的使命，但在实践层面的深度与广度上仍有欠缺。未能将科学解释置于科学文化的范畴中，以阐述科学与文化的关系，这一普遍性问题限制了我国博物馆对科学解释的主题升华。

因此，自然科学博物馆如何突出非正式教育机构的特性，使科学解释达到明确目标定位、促进解释完整性、鼓励多元对话等目标，有待深入研究。

3 博物馆科学解释的发展路径

为了解决上述问题，本文从个人、环境和社会文化三个层次，分别提出了分析目标观众需求、关联解释基础要素和深化教育主题的解决方案，最终形成了自然科学博物馆的科学解释框架（见图2）。

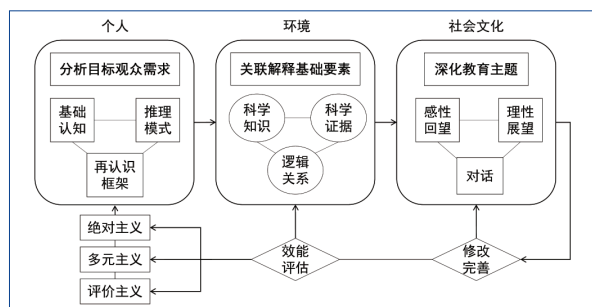


图2 自然科学博物馆科学解释框架

3.1 个人：分析目标观众需求

前述博物馆面临的难点问题之一即目标定位的模糊性，其本质是博物馆对目标观众群体的科学解释需求分析不够充分。基于当前观众的多样性特点，博物馆需要调研观众基础认知、预判其推理模式、设计其再认识架构，从而与观众建立深度的链接。

3.1.1 调研基础认知

对观众的基础认知进行前置性调研，有助于清晰地把握展览和教育活动的主题和详略重点。国际上，对观众的前置性研究已成为博物馆策划展览和教育活动的必要手段。博物馆会根据本馆的受众群体、藏品特色和现存问题，设置专门的评估人员和部门，制定具有针对性的策略^[37]。以进化论主题为例，一项针对美国六座自然历史博物馆高中生和成年人参观者的调研颇具代表性。调研内容选取了化石和岩层、猎豹微进化、个人信仰和地质时间线四个角度，涉及宏观进化和微进化概念、科学的本质、进化论的依据、进化的机制等关键性问题，结果显示，参与者在参观展览或参与教育活动前，能够理解化石是进化的证据，但对进化的机制、如何用自然选择来解释生物变化等问题却知之甚少^[32]，这对深入理解科学理论的本质造成了阻碍。

3.1.2 预判推理模式

在完成对观众基础认知的调研之后，需进一步将观众的推理模式进行分类，理清其与科学理论之间的差距，分析观众在解释过程中的多元视角。以进化现象为例，有学者将观众的推理模式分为四种，分别是引用一个或多个达尔文进化论核心概念的知情自然推理（Informed Naturalistic Reasoning, INR）、运用直觉思维的新手自然推理（Novice Naturalistic Reasoning, NNR）、引用超自然解释的神创论推理（Creationist Reasoning, CR）、以及混合推理（Mixed Reasoning, MR）。调查结果显示，大多数的受访者（72%）综合使用了知情自然推理和新手自然推理来解释进化现象^[37]。博物馆应分析主体受众的推理模式，将其推理逻辑与疑难梳理透彻，抓住解释痛点，进而通过组织博物馆语言，推动观众推理模式的优化升级，促进其向科学化的方向发展。

3.1.3 设计再认识架构

博物馆应基于观众固有的推理模式，通过运用科学推理的认识论架构，传递科学解释，完善、修正、重构观众的解释模型，以提升观众的现有认知。当观众的认识与外界理论发生碰撞时，按照对个人认识的信念强度，可以将观众的再认识架构划分为三种类型，分别是绝对主义者（强调事实和专家是认识的基础）、多元主义者（强调情感和信念重于事实，个人观点具有合理性）、评价主义者（强调观点具有可比较性、可评价性）^[38]。观众对外界理论的冲击会产生不同程度的反应，并随之强化或弱化已有认知。值得注意的是，情景过于复杂也会导致再认识弱化。这一再认识架构是博物馆科学解释的后置闭环，有助于启发博物馆将不同解释内容对应于不同再认识强度的群体，有的放矢地传递科学理论。

3.2 环境：关联解释基础要素

3.2.1 使用概念隐喻理论建立基础要素架构

在环境层面上，博物馆要做到吸引观众，首先应将科学语言转化成博物馆语言，使观众初步理解科学知识。在认知科学领域，为了传达复杂概念而构建的隐喻和类比，被认为是解释科学的最有效的方法之一^[39]。概念隐喻理论（Conceptual Metaphor Theory, CMT）的基础架构是“双域映射”模型（Two-domain Model），“双域”指源域（Source Domain）和目标域（Target Domain），映射是指把人们熟悉的、具体的源域与较为抽象的目标域，建立对应关系的过程。映射的本质不是语言，而是思维和推理（Thought and Reason）^[40]。

概念隐喻理论通过引入新的介质（或称为脚手架），建立意象图式，来解释复杂的科学原理。引入的介质具有通俗性、互动性、与解释要素紧密相关等特点，能够促进观众

从理解简单事物到认知复杂理论^[41]。最终形成完整的解释链，使观众对科学解释过程具有连贯性、直观性和结构性的理解，降低观众认知难度。

例如“进化创造多样性（Evolution Creates Diversity）”展览中使用的“弹球游戏（Pinball Game）”^[42]，即是运用概念隐喻理论的典型案例（见图3）。此装置由弹球、游戏板组成，游戏板的纵向延伸代表时间轴，横向分支代表人类的进化过程，弹球会在轨道内随机滑向某一分支终点，或在滑动过程中掉进坑洞里。其中弹球（源域）对应于进化之路上的一个实体人类（目标域），弹球在节点随机滑向某一分支的过程（源域）对应于进化的随机原理（目标域），球掉进坑洞（源域）对应于某一实体人类的灭绝（目标域）。弹球从2000万年以前的时间点开始出发，终点结束于尼安德特人或灵长类动物，对应的是人类从产生至物种灭绝，或最终进化为黑猩猩、人类的过程。此案例将人类进化过程映射为弹球游戏，促进了观众对人类起源与进化概念的理解。

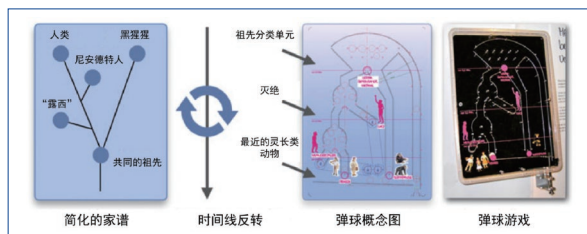


图3 弹球游戏的设计过程^[42]

此外，博物馆运用概念隐喻理论传递科学知识，即便使用的是静态化的解释面板（例如用蛋糕、巧克力类比地层变迁^[43]），也能够产生很好的效果。换言之，我们对科学解释方法有效性的判断标准应为是否降低了复杂性理论的理解难度，而非是否采取了互动的形式。

3.2.2 使用解释模型完善科学解释过程

科学知识、科学证据和逻辑关系是构成

博物馆科学解释的基本要素，科学解释模型能够通过选取准确的科学证据，建立科学证据与科学知识之间的逻辑关系，弥补博物馆碎片性信息展示的弱点，将解释过程表达完整。

选取科学证据是完善解释过程的基础性步骤。很多博物馆提供给观众观察、触摸实物标本的机会，这在赋予观众直接经验、激励观众探索上起到了积极的作用。纽约科技馆策划的“进化与健康的联系”（The Evolution Health Connection）展览，通过对观众兴趣的预测，选取了与观众生活紧密相关的科学现象——两足行走、分娩和背痛，非洲和肤色，狩猎采集者和肥胖，放牧和乳糖不耐症等^[44]，充分构建人的身体特征、饮食习惯与进化之间的关系，以便于观众理解进化并非遥远的理论，而是与生活常见的现象息息相关，使观众相信他们有认知的基础。展览评估结果显示，较之于没有参观过此展览的观众，参观者能够更全面地描述健康问题并分析其影响因素。

运用科学解释模型，建立科学证据和科学知识之间的逻辑关系，是完善解释过程的核心步骤。实际上，这一过程也是再现科学家推理解释的过程，能够促进观众理解科学理论的实质。如解释地质时期景观演变规律这一科学理论时，在确定了将成形—形变—塑造（Forming-Deforming-Shaping）作为基本架构后，运用了因果解释模型逐项串联更多的科学概念^[45]。在解释成形（Forming）过程中，对碎屑物的运输和沉积、有机残余物和骨骼矿物堆积等内容进行了串联；搭起分支架构后，再将单一现象的解释提炼为一般性解释，即整个岩石形成序列的过程被视为

存在至地质时代结束的循环模式：岩石经过风化和侵蚀过程，形成新的沉积物，随后再次变成岩石。

3.3 社会文化：深化教育主题

博物馆在传递科学解释的同时，也应为观众提供发声的机会，使观众在思维的碰撞中深化对科学的理解、不断提升辩证思维能力。例如，伦敦大学学院格兰特动物博物馆在其设计的平板电脑互动装置中提出了有关生命科学和自然历史的诸多“挑战性”问题，观众可以将自己的观点自由发表到上面^[46]。科学解释的逻辑约束性和个人观点的开放性之间看似存在矛盾，实则不然，博物馆作为社会公共文化机构，与观众之间的沟通是双向的，且需要在不断的碰撞中进一步完善科学解释框架。

此外，博物馆应在多元落点中注重传递共性的价值观，而非仅重视科学解释的理论知识。只有这样才能将主题深化到更广泛、更具现实指导意义的维度上，使观众在平等交流中升华认知，建立情感联系，实现科学解释的情感维度目标。例如国家海洋博物馆在解释“许氏创孔海百合”化石的过程中，选取了许德佑及助手在野外采集标本时被匪徒杀害身亡、为了纪念他而将化石命名的感人故事^[47]，将科学实践上升到了科学家精神的高度；北疆博物院南楼展示了法国博物学家桑志华在25年考察中取得的硕果^[48]，也展示了他难以与母亲相聚的遗憾，很多观众在参观后都产生了情感反应和积极宣传的倾向^①。实际上，理性的科学理论不代表自然科学博物馆的全部，感性地展示科学工作者的“人”的角色及职业特征也是不可或缺的一部分，而且是与观众建立情感纽带的重要途径之一。

①北疆博物院南楼展厅2019年观众留言册摘录：“此次参观有很多收获，我了解到了不同的年代下这所博物馆、这所学校的发展历程，通过这些，我看到了中国青年与国际友人对科学事业的奉献与支持，希望今后这所博物馆能有更多的人来一览它的风光。”“向桑志华先生致敬，愿科学探索精神传承，愿博物馆感召更多国人！”“桑志华博士留给我们的不仅是考古标本是宝贝，更可贵的是他的坚持、敬业、一丝不苟的科学精神，这也是宝贝，宝贵的精神财富！震撼！”

4 结语

作为我国科普机构中的重要组成部分, 自然科学博物馆应该在向社会公众传播科学的过程中突破解释瓶颈、优化解释结构、创新解释模式, 不断促进解释目标明确化、解释逻辑完整化、解释落点包容化。

本文依托情景学习理论框架, 从个人、环境、社会文化三个层次提出了科学解释的整体架构。首先, 在个人层次上, 博物馆应充分研究观众群体的需求, 前置调研观众的基础认知、科学预判观众的推理模式、合理设计观众的再认识架构, 分析观众解释的逻辑过程, 初步规划科学解释策略。其次, 在

环境层次上, 博物馆应有效关联解释的基础要素, 运用概念隐喻理论建立科学解释架构, 通过类比观众熟悉的事物, 降低其对科学理论的理解难度; 使用解释模型筛选实物标本、关联现象与理论, 构建完整的解释逻辑。再次, 在社会文化层次上, 博物馆应建立对话思维, 搭建双向沟通机制, 同时将科学理论升华为共性价值观, 把弘扬科学精神贯穿于教育全过程。最后, 博物馆应以时间为纵深, 不断完善科学解释的效能评估, 搭建闭环的解释模式。最终, 使自然科学博物馆真正成为向公众普及科学技术知识、弘扬科学精神、传播科学思想、倡导科学方法的坚实阵地。

参考文献

- [1] 全民科学素质行动规划纲要(2021—2035年)[M]. 北京: 人民出版社, 2021.
- [2] 孟庆金. 科研是自然类博物馆的核心竞争力[J]. 中国博物馆, 2013(4): 14-21.
- [3] 刘菁. 加强自然科学类博物馆教育活动中的思维训练[C]//中国科普研究所. 中国科普理论与实践探索——新时代公众科学素质评估评价专题论坛暨第二十五届全国科普理论研讨会论文集. 北京: 科学出版社, 2018: 10.
- [4] Alameh S, Abd-El-Khalick F, Brown D. The Nature of Scientific Explanation: Examining the Perceptions of the Nature, Quality, and “Goodness” of Explanation among College Students, Science Teachers, and Scientists[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2023, 60(1): 100-135.
- [5] National Research Council. Learning Science in Informal Environments: People, Places, and Pursuits[M]. Washington, DC National Academies Press, 2009.
- [6] 郭贵春, 赵晓昶. 一般科学哲学的图景及其特征: 科学解释与意义建构[J]. 科学技术哲学研究, 2017, 34(1): 1-8.
- [7] Woodward J, Ross L. Scientific Explanation. The Stanford Encyclopedia of Philosophy[EB/OL]. (2003-05-09)[2023-05-17]. <http://plato.stanford.edu/entries/scientific-explanation>.
- [8] 张华夏. 科学解释标准模型的建立、困难与出路[J]. 科学技术与辩证法, 2002(1): 29-33.
- [9] Salmon W C. Four Decades of Scientific Explanation[M]. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2006.
- [10] Alameh S, Abd-El-Khalick F. Towards a Philosophically Guided Schema for Studying Scientific Explanation in Science Education[J]. Science & Education, 2018, 27: 831-861.
- [11] Toulmin S E. The Uses of Argument[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [12] McNeill K L, Krajcik J. Supporting Grade 5-8 Students in Constructing Explanations in Science: The Claim, Evidence, and Reasoning Framework for Talk and Writing[M]. New York: Pearson Allyn & Bacon, 2012.
- [13] Loch Q. The Impact of Claim-Evidence-Reasoning Writing Techniques on Argumentation Skills in Scientific Investigations[D]. Bozeman: Montana State University, 2017.
- [14] 潘洪建, 盛群力. CER 教学: 引导学生建构科学解释[J]. 开放教育研究, 2019, 25(5): 64-72.
- [15] Tang K S. Constructing Scientific Explanations through Premise-Reasoning-Outcome (PRO): An Exploratory Study to Scaffold Students in Structuring Written Explanations[J]. International Journal of Science Education, 2016, 38(9): 1415-1440.
- [16] Papadouris N, Vokos S, Constantinou C P. The Pursuit of a “Better” Explanation as an Organizing Framework for Science Teaching and Learning[J]. Science Education, 2018, 102(2): 219-237.
- [17] De Andrade V, Freire S, Baptista M. Constructing Scientific Explanations: A System of Analysis for Students’ Explanations[J]. Research in Science Education, 2019, 49: 787-807.
- [18] Falk J H, Dierking L D. The Museum Experience Revisited[M]. London and New York: Routledge, 2016.
- [19] Falk J H, Dierking L D. Learning from Museums[M]. Lanham: Rowman & Littlefield, 2018.

- [20] Falk J, Storksdieck M. Using the Contextual Model of Learning to Understand Visitor Learning from a Science Center Exhibition[J]. *Science Education*, 2005, 89(5): 744–778.
- [21] Falk J H, Heimlich J, Bronnenkant K. Using Identity-Related Visit Motivations as a Tool for Understanding Adult Zoo and Aquarium Visitors' Meaning-Making[J]. *Curator: The Museum Journal*, 2008, 51(1): 55–79.
- [22] Gentner D, Levine S C, Ping R, et al. Rapid Learning in a Children's Museum Via Analogical Comparison[J]. *Cognitive Science*, 2016, 40(1): 224–240.
- [23] Legare C H, Gelman S A, Wellman H M. Inconsistency with Prior Knowledge Triggers Children's Causal Explanatory Reasoning[J]. *Child Development*, 2010, 81(3): 929–944.
- [24] 宋向光. 博物馆陈列的实物性元素及内容结构析 [J]. *东南文化*, 2016(2): 111–118.
- [25] Nesimyan-Agadi D, Ben Zvi Assaraf O. How Can Learners Explain Phenomena in Ecology Using Evolutionary Evidence from Informal Learning Environments as Resources?[J]. *Journal of Biological Education*, 2023, 57(1): 170–183.
- [26] Nicholl J, Davies P. Participating in an Object-based Learning Project to Support the Teaching and Learning of Biological Evolution: A Case Study at the Grant Museum of Zoology[J]. *Evolution Education Re-considered: Understanding What Works*, 2019: 307–330.
- [27] 黄亚萍, 王建强, 侯瑜琼. 突发公共事件背景下的主题科普展览策划研发探析 [J]. *科技传播*, 2020, 12(21): 15–18.
- [28] Russell C A, Régner Denois V, Rouèche E, et al. Empowerment Through Participation in a Cancer Prevention Exhibit: Evidence from the Hyg e Lab Intervention[J]. *Journal of Cancer Education*, 2021, 36: 519–531.
- [29] Moreira L M, Marandino M. Theater in Brazilian Science Museums and Centers[J]. *Hist ria, Ci ncias, Sa de-Manguinhos*, 2015, 22: 1735–1748.
- [30] Booth A E, Shavlik M, Haden C A. Parents' Causal Talk: Links to Children's Causal Stance and Emerging Scientific Literacy[J]. *Developmental Psychology*, 2020, 56(11): 2055.
- [31] Letourneau S M, Meisner R, Sobel D M. Effects of Facilitation vs. Exhibit Labels on Caregiver-child Interactions at a Museum Exhibit[J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12: 637067.
- [32] MacFadden B J, Dunckel B A, Ellis S, et al. Natural History Museum Visitors' Understanding of Evolution[J]. *AIBS Bulletin*, 2007, 57(10): 875–882.
- [33] Afonso S, Afonso A S, Rodrigues F. Towards an Effective Use of Language to Explain Light in the Museum[J]. *Science Education*, 2019, 103(4): 923–946.
- [34] 史吉祥. 描述·解释·改变——博物馆观众研究的三重境界 [J]. *东方考古*, 2018(00): 214–217.
- [35] Humphrey T, Gutwill J P. *Fostering Active Prolonged Engagement: The Art of Creating APE Exhibits*[M]. Walnut Creek, CA: Left Coast Press, 2005.
- [36] Van Praet M. Heritage and Scientific Culture: The Intangible in Science Museums in France[J]. *Museum International*, 2004, 56(1–2): 113–121.
- [37] Spiegel A, Evans M, Gram W, et al. Museum Visitors' Understanding of Evolution[J]. *Museums & Social Issues*, 2006, 1(1): 69–86.
- [38] 王婷婷, 吴庆麟. 个人认识论理论概述 [J]. *心理科学进展*, 2008(1): 71–76.
- [39] Gilbert J K, Justi R. *Modelling-based Teaching in Science Education*[M]. Basel, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [40] Lakoff G. *The Contemporary Theory of Metaphor*[C]//Andrew O. *Metaphor and Thought* (2nd ed). New York: Cambridge University Press, 1993.
- [41] Niebert K, Gropengiesser H. Understanding Starts in the Mesocosm: Conceptual Metaphor as a Framework for External Representations in Science Teaching[J]. *International Journal of Science Education*, 2015, 37(5–6): 903–933.
- [42] Gro  J, Kremer K, Arnold J. Evolution Learning and Creationism: Thinking in Informal Learning Environments[J]. *Evolution Education Re-considered: Understanding What Works*, 2019: 285–305.
- [43] Venturini C, Pasquar  Mariotto F. Geoheritage Promotion through an Interactive Exhibition: A Case Study from the Carnic Alps, NE Italy[J]. *Geoheritage*, 2019, 11(2): 459–469.
- [44] Weiss M, Evans E M, Palmquist S. The Evolution Health Connection—integrating the Visitor Perspective: Significance for Evolution Education[J]. *Museums & Social Issues*, 2016, 11(1): 25–33.
- [45] Pasquar  Mariotto F, Venturini C. Strategies and Tools for Improving Earth Science Education and Popularization in Museums[J]. *Geoheritage*, 2017, 9(2): 187–194.
- [46] Ross C, Hudson-Smith A, Terras M, et al. Enhancing Museum Narratives: Tales of Things and UCL's Grant Museum[C]//DH. 2011: 360–361.
- [47] 严亚玲, 彭泳, 张程瑜, 等. 浅谈博物馆陈列展览方式的优化——以国家海洋博物馆《远古海洋》展览为例 [J]. *博物馆研究*, 2019(3): 5.
- [48] 王磊. 桑志华与北疆博物院 [J]. *自然科学博物馆研究*, 2016, 1(3): 87–92, 97.

(编辑 颜 燕 袁 博)