美国《新一代科学教育标准》中物质科学内容述评

关　菲　彭朝阳

（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明　650500）

摘　要：随着科技的飞速发展，科学教育已成为国际教育界的研究热点，是各国建设科技强国的重要途径和关键抓手.美国强大科技竞争力的背后源于其国家科学教育体系的支撑.以“物质科学”领域为例，通过深度解读美国《新一代科学教育标准》，剖析美国科学教育标准的整体架构及内容特点，探索我国科学教育的未来发展新蓝图，推动我国新时代教育使命的有效落实.

关键词：《新一代科学教育标准》；NGSS；物质科学；科学教育

自 1996 年由美国国家研究理事会（NATIONAL RESEARCH COUNCIL，简称 NRC）颁布第一部科学课程标准以来，科学教育研究一直是美国基础教育研究的热点.2013 年美国颁布了《新一代科学教育标准》（*Next Generation Science Standards*，简称 NGSS），重构了国家科学教育标准，提出了新阶段美国科学教育发展愿景，其对科学教育标准的定义反映了时代对学生应当具备的科学素养的要求.

科学教育是与传授科学知识、提升科学素养、培育科学精神、培养科技人才有关的教育活动.[1] 通过剖析美国《新一代科学教育标准》的组织架构、内容理念、科学愿景，并以“物质科学”领域为切入点开展内容评述与特点解读，为我国科学教育发展与改革提供有效思路，从而实现与国际科学教育的接轨.

1　美国《新一代科学教育标准》

为改善科学教育体系，给学生提供具有国际标准的科学教育.NGSS 以原有的美国国家研究委员会（NRC）开发的《K－12 年级科学教育框架：实践、跨学科概念和核心概念》（*A Framework for K－12 Science Education：Practices，Crosscutting Concepts，and Core Ideas*，简称“框架”）为基础开发了 K－12 科学标准，它以“科学与工程实践”为轴心，与“跨学科概念”“学科核心概念”共同构成了美国科学教育课程标准的主体.[2]

1.1　整体框架

NGSS 列出了提供高质量科学教育所需的维度，其总体框架由科学与工程实践（Science and Engineering Practices）、学科核心概念（Disciplinary Core Ideas）和跨学科概念（Crosscutting Concepts）3 个维度构成，见图 1.

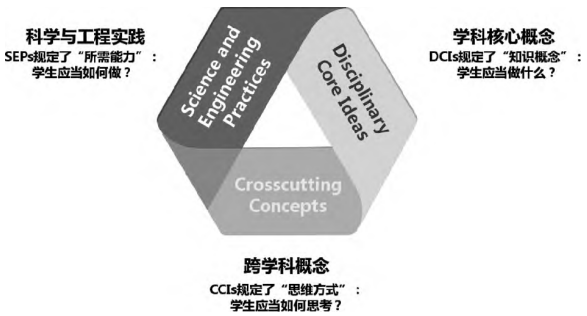

图 1　NGSS 的三维关系示意图

NGSS 中每条标准均拥有统一的格式框架且通过颜色进行维度划分，如表 1，自上而下依次为标题（Title）、预期表现（Performance Expectations）、基础盒（Foundation Boxes）和连接页面（Connections Pages）.标题以学科核心概念或主题命名，通过预期表现对“学生应当知道和能够做的事情”[3] 进行可评价陈述，预期表现框下面并列了 3 个维度的基础盒（Foundation Boxes），从左至右列出了具体的 SEPs、DCIs 和 CCIs，页面底部的注释指出了“与同年级其他学科核心概念相关联”“与跨年级相关学科核心概念相关联”“与州共同核心标准相关联”的可跳转页面.此外，实际文件中每条预期表现后面还有红色标出的说明（Clarification Statement）及评价边界（Assessment Boundary）.

基金项目：本文系云南省教育厅科学研究基金项目资助课题“PISA 视域下基于社会性科学议题的中学科学教育实践研究”（项目编号：2024Y181）的阶段性研究成果.

通信作者：彭朝阳（1971—），男，江西安福人，云南师范大学教授，博士，博士生导师，研究方向为物理课程教学和天体物理.电子邮箱：312379583@qq.com.

中国知网　https://www.cnki.net

表 1 NGSS 的格式框架

<table>
<tr><td colspan="3">Title-by disciplinary core ideas or topics
按学科核心概念或主题的标题</td></tr>
<tr><td colspan="3">Performance expectations
预期表现
Students who demonstrate understanding can:
……</td></tr>
<tr><td>Science and Engineering Practices
科学与工程实践</td><td>Disciplinary Core Ideas
学科核心概念</td><td>Crosscutting Concepts
跨学科概念</td></tr>
<tr><td colspan="3">Connections to
连接页面
• Other science disciplines at this grade level 同年级中其他学科核心概念的联系
• Other DCIs for older and younger students 跨年级学科核心概念的关联
• Common Core State Standards in Mathematics and Language Arts 与通用核心国家标准的联系</td></tr>
</table>

1.2 内容概述

NGSS 的内容建构贯穿美国整个 K－12 教育体系，其地位相当于我国小学科学、初高中物理、化学、生物、地理、通用技术等所有理工科课程标准的综合.以概念描述的方式明确规定了 K－12 年级所有学生应该学习的具体内容，[4] 具体内容如表 2.

表 2 NGSS 的三维理念基础框

	学科核心概念	跨学科概念
提出问题和定义问题 开发和使用模型 计划和开展研究 分析和解读数据 使用数学和计算思维 建构解释和设计解决方案 参与基于证据的论证 获取、评价和交流信息	PS 物质科学 LS 生命科学 ESS 地球与空间科学 ETS 工程设计	模式 原因和结果 尺度、比例与数量 系统与系统模型 系统中的能量、物质结构、功能系统的稳定与变化[2]

科学与工程实践维度描述了科学家进行探究、建立模型和理论所使用的主要实践，以及工程师在设计和建立系统时用到的工程实践.[5] 用“科学与工程实践”替代了原有的“作为探究的科学”，[6] 期望学生能够亲身经历实践，摆脱“伪探究”，不仅拥有技能还具备针对性知识，从而更好地理解科学本质.

NGSS 中提供了 7 个跨学科概念，旨在给学生一个用于理解世界的组织架构并帮助学生跨学科、跨年龄段地理解和连接学科核心概念.[3] 跨学科概念为不同科学领域中相关学科核心概念提供连接点，为整合样态教学提供具体逻辑载体和方法论基础，利于整合观念的落实和学生横贯能力的提升.

学科核心概念涉及“物质科学、生命学科、地球和空间科学以及工程、技术与科学的应用”4 个领域，在各科学领域中提出了 11 个学科核心概念，解构出 39 个子概念，涵盖了学生在 K－12 阶段期间应当理解的主要科学学科的最基本概念，以学习进阶的形式改善了学生知识获取方式，亦利于学生立体知识体系的建构.

1.3 理念愿景

美国《新一代科学教育标准》旨在反映基于“框架”的美国科学教育新愿景，[3] 它确定了科学教育者和利益相关者需要做出“K－12 教学阶段的科学教育反映科学与现实间的连接、科学概念的连贯一致、科学与工程实践的纳入、更侧重深入理解和内容运用、旨在让学生为大学学习、职业生涯和公民身份做好准备[3]”等 7 个概念转变，利于美国未来科学教育的改善和学生进一步主动追求 STEM 职业生涯的兴趣激发.

NGSS 所采取的立场是“一个有科学素养的人理解并能够应用每个主要科学学科的核心概念，并且他们在科学和工程实践与跨学科概念中能够获取经验”，[3] 其真正创新之处在于“三维进阶制”，将科学概念的建构贯穿于整个 K－12 体系，强调各年级间集中且连续地开展科学知识的动态建构.以学科核心概念的学习进阶为主线，引导科学教育聚焦于大概念和科学知识层级性建构；以整合维度反映科学和工程在现实世界中的实践意义，为学生提供有多学科知识的学习境脉；以学生期望表现整合基础框中的 3 个维度内容，使得各维度间建立起意义连接，达成了科学教育标准的一致性与一贯性.

2 美国 NGSS 中“物质科学”领域的内容述评

美国新一代科学标准中涵盖了物质科学、生命科学、地球与空间科学、工程设计 4 大领域，拥有多个兼备认识论、方法论、意义论的高阶活性观念.以“物质科学”领域为例，对其进行多维度多方面的内容述评和解读，加深读者对 NGSS 的认知、理解及应用，为我国科学教育提供国际视野的指南针和脚手架.

2.1 物质科学领域的概念剖析

NGSS 在物质科学领域中甄选出 4 个二级核心概念，解构出 13 个子概念并进行了字母编码，

中国知网 https://www.cnki.net

如图 2.以“物质科学”为大概念,从“学科核心概念”到“二级核心概念”再到“核心子概念”自上而下统摄各维度的孤立子概念,选取主体性强、区分度高的核心子概念提升概念的层级感,利于学生对于学科内在逻辑的掌握和科学知识本质的理解.

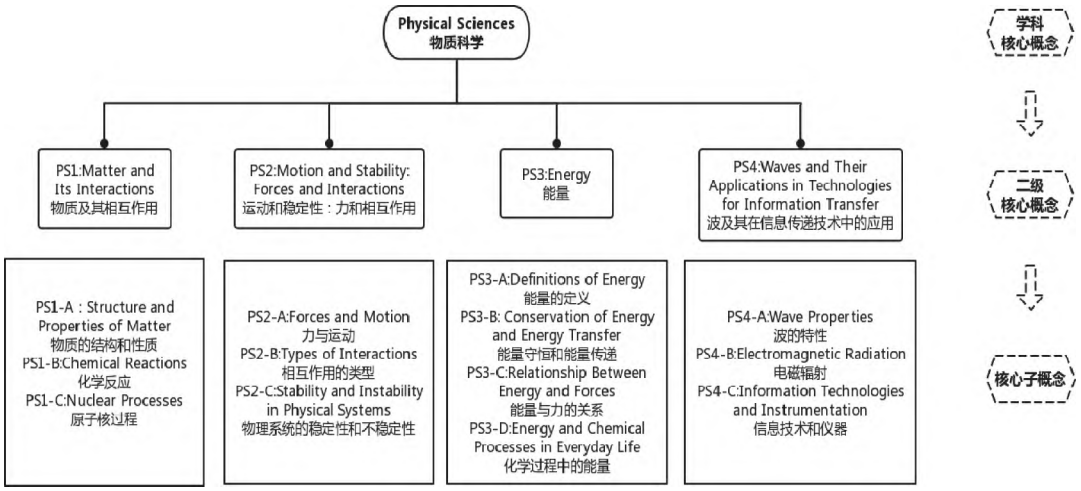

图 2 物质科学领域的学科核心概念剖析图

2.2 物质科学领域的序列对比

NGSS 中拥有按学科核心概念和主题的两种序列,均分为幼儿园到五年级、初中、高中 3 个阶段,且为便于预期表现的代码解读提供了 GLOSSARY(术语表),增强了科学知识认知架构的建构性,更符合学生的认知发展规律.

按学科核心概念序列指选取适配各年级阶段学习进度与各学龄学生认知特征的内容呈现及编排学科概念,如表 3,该序列更关注核心概念的生长性和延展度,利于学生学科思维的培养和深度学习的发生.

表 3 按年级学科核心概念序列的物质科学领域

Physical Science 物质科学	
PS1:Matter and Its Interactions 物质及其相互作用 PS2:Motion and Stability: Forces and Interactions 运动和稳定性:力和相互作用 PS3:Energy 能量 PS4:Waves and Their Applications in Technologies for Information Transfer 波及其在信息传递技术中的应用	
Kindergarten Through Fifth Grade 幼儿园到五年级物质科学	K—PS2 K—PS3 1—PS4 2—PS1 3—PS2 4—PS43 4—PS4 5—PS1 5—PS2 5—PS3
Middle School Physical Sciences 初中物质科学	MS—PS1 MS—PS2 MS—PS3 MS—PS4
High School Physical Sciences 高中物质科学	HS—PS1 HS—PS2 HS—PS3 HS—PS4

按主题序列指将同一学科或跨学科领域中的相似概念、共生知识汇编并以主题的形式呈现,如表 4,该序列更重视各层级概念间的交互性和概念自身的逻辑性,利于学生整合意识的强化和横贯能力的提升.

表 4 按主题序列的物质科学领域

年级	主题
Kindergarten 幼儿园	K. Forces and Interactions: Pushes and Pulls 力和相互作用:推力和拉力
Second Grade 二年级	2. Structure and Properties of Matter 物质的结构和性质
Third Grade 三年级	3. Forces and Interactions 力和相互作用
Fourth Grade 四年级	4. Energy 能量 4. Waves: Waves and Information 波:波和信息 4. Structure, Function, and Information Processing 结构、功能和信息处理
Fifth Grade 五年级	5. Structure and Properties of Matter 物质的结构和性质 5. Matter and Energy in Organisms and Ecosystems 生物体和生态系统中的物质和能量
Middle School Physical Sciences 初中物质科学	MS. Structure and Properties of Matter 物质的结构和性质 MS. Chemical Reactions 化学反应 MS. Forces and Interactions 力和相互作用 MS. Energy 能量 MS. Waves and Electromagnetic Radiation 波和电磁辐射

中国知网 https://www.cnki.net

续表

年级	主题
High School Physical Sciences 高中物质科学	HS.Structure and Properties of Matter 物质的结构和性质 HS.Chemical Reactions 化学反应 HS.Forces and Interactions 力和相互作用 HS.Energy 能量 HS.Waves and Electromagnetic Radiation 波和电磁辐射

值得一提的是，上述两种序列方式均遵循了学习进阶理念(Learning progressions，简称 LPs)，为组织和调整科学知识、教学指南及评估策略提供了一种有前途的方式，[7] 使学生有机会在长期阶段内对科学大观念进行深入且综合的理解.

2.3 物质科学领域的特点解读

以高中物质科学领域中的“能量”为例，对 NGSS 中预期表现、学科核心概念、跨学科概念、科学和工程实践进行多维度系统剖析，挖掘并剖析“三维进阶制”，且通过理念交互性、认知深层化、思维创新性和能力横贯性提升学生的认知层次、思辨水平和实践能力.

2.3.1 以预期表现实现三维理念交互性

新时代科学教育要求“学生掌握实践、内容及其连接的交互”，[3] NGSS 提出了能够整合 3 个维度的预期表现，为科学教育在真实课堂中的有效展开奠定了基调.它不同于以往的标准文件，预期表现中避开了“知道”“理解”等不易被量化评估的词汇，选取了“开发、使用、设计”等可视化动词，对学生在教学结束时应当做到的事情作出了可评价描述.

预期表现沿用了“框架”中的代码形式，与基础盒中 3 个维度的代码一致，共 3 个部分.第一部分表示学段，下一个字母数字代码指定了学科、核心概念和子概念，代码末尾数字表示该语句作为学科核心概念出现的顺序.[3] 以表 5 为例，“HS－PS3 Energy”中 HS 表示高中学段，PS 为物质科学领域，3 为“能量”出现的顺序.预期表现中体现了具体的三维理念内容，如“计划和开展研究”等即为科学与工程实践内容、“能量守恒与能量传递”等即为学科核心概念内容、“能量和物质”等即为跨学科概念.每条标准后面均伴随着说明和评价边界，如 HS－PS3－1 标准后注明了“重点在于解释模型中使用的数学表达式的意义”“评价仅限于基本的代数表达或计算”等内容，便于评估要素的选取及学习重点的凸显，进而利于“教—学—评”一致性的建构.

表 5 高中学段“PS3 能量”的预期表现

HS－PS3 Energy 能量
Performance Expectations 预期表现
HS－PS3－1：开发一个计算模型，在一个系统的其他组件的能量变化和进出系统的能量流已知的情况下计算系统中某个组件能量的变化；[说明：重点在于解释模型中使用的数学表达式的意义.][评价边界：评价仅限于基本的代数表达或计算；仅限于由 2～3 个组件组成的系统；仅限于热能、动能或引力场、磁场、电场中的能量.]
HS－PS3－2：开发和使用模型，描述宏观尺度上的能量可用物体运动有关的能量和与物体相对位置有关的能量来解释；[说明：宏观尺度的现象可以包括动能向热能的转化、因物体相对于地面的高度而储存的能量，两个带电盘子间储存的能量.模型可以是图表、图画、描述和计算机模拟.]
HS－PS3－3：设计、建造和改进一个设备，在给定约束条件下运作，将一种形式的能量转化为另一种形式；[说明：关注对设备的定性与定量评价.设备的粒子可包括鲁布·戈德堡机械装置、风力涡轮机、太阳能电池、太阳能灶和发电机.约束条件可以包括使用可再生能源和效率.][评价边界：定量评价仅限于考察一定能量输入条件下的总能量输出.评价仅限于用教师提供的材料所建造的设备.]
HS－PS3－4：计划和开展研究，提供证据说明在一个封闭系统中将两个不同温度的组件结合在一起时发生的热能传递会导致该系统中组件间更均匀的能量分布(热力学第二定律)；[说明：强调分析学生研究中得到的数据以及运用数学思维定量和概念性地描述能量变化.研究的例子可以包括混合不同初始温度的液体，或将不同温度的物体加入水中.][评价边界：评价仅限于以教师提供的材料和工具为基础的研究.]
HS－PS3－5：开发和使用一个关于两个通过电场和磁场相互作用的物体的模型，描述物体间的力和物体由于相互作用而发生的能量变化.[说明：模型的例子可以包括图画、图表、文本，比如用图画展示当两个异种电荷相互靠近时会发生什么.][评级边界：评价仅限于含两个物体的系统.]
＊ 这项预期表现通过实践或学科核心概念将传统科学内容整合到工程中

2.3.2 以学科核心概念进阶实现认知深层化

知识飞速更新的时代对复合型人才的需求呈指数型增长，科学教育的重要任务不再是传授“一切事实”而是“让学生拥有足够的核心知识以便日后能够自己掌握更多信息”.[3] NGSS 利用学科核心概念统摄碎片化知识，将概念按照逻辑脉络组织成符合学习进阶层级的结构化教学指南，极大程度地降低了学生的认知负荷.

以“能量的定义”子概念为例，如图 3，从“物体运动与能量的关系”“能量的传递”到“动能、势能”“物质微粒平均动能”再到“能量的系统定量属性”“宏观尺度的能量表现形式”“微观尺度的能量形

中国知网 https://www.cnki.net

式建模”的概念认知升级，逐渐帮助学生组建从现象到本质、从宏观到微观的由浅至深的“能量的定义”概念层级，既契合学科核心概念的内部知识逻辑，又符合学生的认知规律，有利于新知识的接受和学生自我发展意识的强化.[8]

概念进阶

学段	PS3.A:Definitions of Energy 能量的定义
HS-PS3	• 能量是一个系统的定量性质，它取决于系统内物质的运动和相互作用以及系统内的辐射.(HS-PS3-1、2) • 在宏观尺度上，能量能通过多种方式表现自己，比如运动、声、光和热能.(HS-PS3-2、3) • 这些联系在微观尺度上可以更好地被理解，因为在微观尺度上所有的能量形式都可被建模为与微粒的运动和分布有关的能量的组合(HS-PS3-2)
MS-PS3	• 运动的能量被转化为动能，它与运动物体的质量成比例，随着运动速度的平方而增长.(MS-PS3-1) • 一个物体系统还可能包含储存能(势能)，这取决于物体的相对位置.(MS-PS3-2) • 温度是物质微粒平均动能的量度.温度与系统总能量的关系取决于物质的类型、状态和量.(MS-PS3-3,4)
4-PS3	一个物体运动得越快，它拥有的能量越多.(4-PS3-1) 能量可以通过运动的物体或通过声、光或电流从一处传递到另一处.(4-PS3-2,3)

图 3　PS3－A“能量的定义”的概念进阶

2.3.3　以跨学科概念实现思维创新性

“跨学科”是一种全新视角，跨学科概念能够为不同领域的科学知识提供联系的桥梁，利于提升学生对科学知识的组织力和理解力，生成解决科学问题的统一思维方式.NGSS 基于“框架”构建了跨学科概念的年级段终点，为各个科学领域间科学知识的交互性和学生预期表现的实践性赋予了现实意义.

通过跨学科概念使学生在多学科背景下单独和组合地学习与应用科学实践，[3] 从图 4 中可以发现“PS3 能量”中跨学科概念的分布具有层级性，学生从幼儿园开始就有意识地接触“原因与结果”概念，“能量与物质”概念从四年级持续到高中学段，过程性地帮助学生把握跨领域内容间的互通性认知和逻辑性关系，利于学生创造性思维的生成.

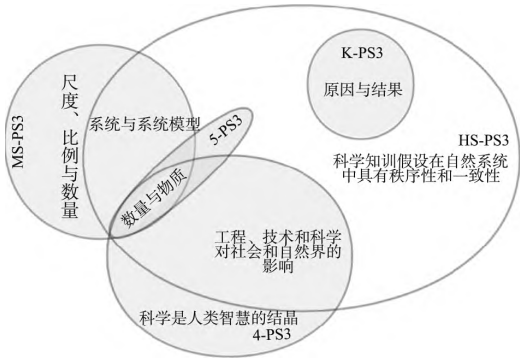

图 4　“PS3 能量”中跨学科概念的韦恩分布图

2.3.4　以科学和工程实践实现能力横贯性

科学与工程实践并非处于“真空”中，NGSS 用 practice“实践”一词代替了以往的 skills“技能”、inquiry“探究”等词汇，整合了科学实践与工程实践，提出了所有完整的科学活动中所需的 8 项实践(见表 2).通过结合实践与内容的方式提供真实的活动情境，赋予科学知识以现实意义，提升学生解决真实问题的横贯能力.

NGSS 建构了科学与工程实践的发展体系，每项实践在各个学段均呈现出一定的能力水平，且能力水平会进阶式发展与深化.以图 5 中“开发和使用模型”为例，NGSS 中该项能力从“使用和建立”到“建立和修正”“开发、使用和修正”直至“使用、综合和开发”，引导学生逐层提升建模意识和能力.

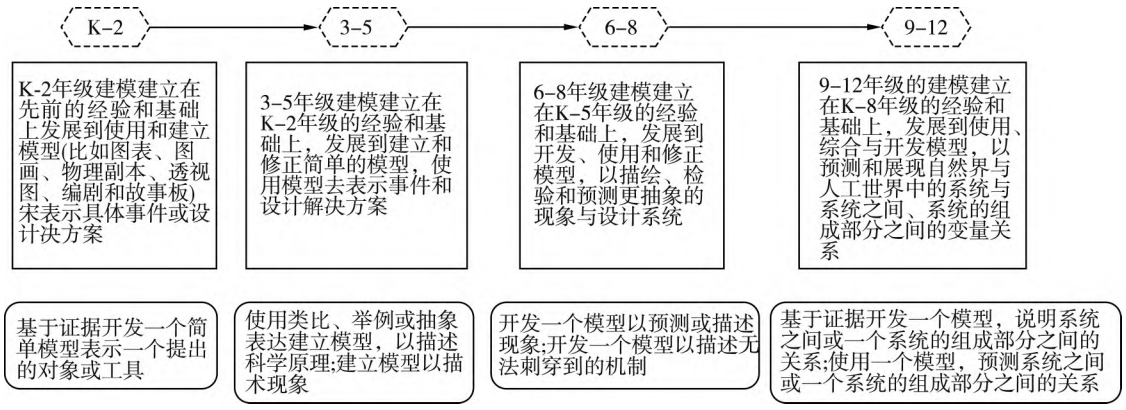

图 5　“开发和使用模型”的发展历程图

中国知网 https://www.cnki.net

NGSS 亦重视科学教育中的情感领域(涉及兴趣、经验和热情的学习领域),重视对科学与工程概念的发展史、科学与工程实践者的贡献史以及这些贡献的应用史的讨论,进而激发学生对科学和工程实践方面的兴趣.[3] 例如提出"设备的例子可以包括鲁布·戈德堡机械装置、风力涡轮机、太阳能灶和发电机"等,运用 HPS 教育理念引领学生认识科学本质及科学·技术·社会·环境(STSE)的关系,形成科学态度、科学世界观和正确价值观.

3 美国 NGSS 的教育启示与展望

在知识经济大放异彩、科技创新成为国际战略博弈主战场的时代背景下,科学教育已成为各国建设科技强国的重要途径和关键抓手.美国 NGSS 是国际科学教育领域最核心的标准,其中蕴含着丰富的科学教育理念、模式、方法等,能够为我国未来科学教育的变革与发展提供颇多的理论新思路和实践新途径.

3.1 建构核心概念,重视大概念教学

大科学观的发展呼吁整合意识的回归,学生核心素养和横贯能力的培养亦须整合观念的落实.NGSS 中建构了系列层级分明、螺旋进阶的学科核心概念,深化了整合样态教学的研究维度.我国科学教育亦应当建构符合学生认知发展规律的结构化知识体系,凸显出大概念在课程教学中的核心地位,重视以大结构审视教学内容,以大视域确立教学目标,以大情境组织具体教学活动,逐步建立完备和谐的物理图景.

3.2 加强学科关联,落实跨学科观念

"跨学科"是一种全新视角,NGSS 中提及的跨学科观念是当前科学教育的研究热点,亦是培养学生科学素养的关键.我国科学教育应主动搭建起各学科知识间沟通的桥梁,培养学生分析问题的整体视域和横贯思维,引导学生在综合应用科学知识的过程中深入理解科学本质,从而养成解决巨型社会问题的意识和能力.

3.3 凸显实践取向,促进 STEM 融合

20 世纪 80 年代初,英国和美国开始将"使所有学生了解科学、技术和社会之间的关系"视为重要目标.[3] NGSS 重视科学与工程实践,鼓励教师在教学中采用多种实践形式连接科技与社会,拓宽了实践的教育视域.我国科学教育须"整合社会各方资源、丰富实践活动",不仅重视学科实践带来的综合性活动,亦注重社会实践带来的研究性活动,在追求科技创新的过程中体现科学实践观,加深对科学教育服务强国建设的认知与落实.

3.4 关注预期表现,推动"教—学—评"一致性

预期表现的阐述方式为 NGSS 的首要创新点,"评价边界"等众多显性评价指标利于我国新课标改革中评价导向的实施.科学教育应凸显学生发展的主体地位,促进形成性评价与总结性评价的深度结合,以多主体、多方法、多维度的评价方式全面客观地反馈学生核心素养发展情况,突出"教—学—评"一致性,[9] 进而引导学生在学习过程中不断反刍,养成深度学习所需的自主学习意识且能够真正收获学习意义.

参考文献:

1 王颖,范佳萍,李倩倩.美国科学教育战略举措的经验与启示[J].智库理论与实践,2023,8(5):35-46.

2 张红霞.义务教育阶段科学课程"探究实践"核心素养学习进阶设计的思考——基于美国《新一代科学教育标准》的启示[J].人民教育,2023(7):70-74.

3 NGSS Lead States. Next generation science standards: For States, By States [M]. Washington DC: The National Academies Press, 2013.

4 白璐,白少民.美国新一代 K-12 科学教育标准中的物理学核心概念及启示[J].物理教师,2016,37(3):2-5.

5 冯翠典.美国新一代《K-12 年级科学教育框架》简介[J].比较教育研究,2013,35(5):97-102.

6 邓磊.NGSS 对我国中学物理课程改革的影响及启示研究[J].物理教学探讨,2019,37(12):1-4.

7 Shawn Y S, Cesar Delgado, Joseph S K. Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2010(6): 687-715.

8 关菲,管彤彤,彭朝阳.指向深度学习的物理单元教学模式——以"磁场"为例[J].物理教学探讨,2023,41(9):33-38.

9 魏国强,程惠敏,张成欣.高中物理生态课堂学生课堂表现观察指标体系的建构[J].物理教师,2019,40(8):2-3,9.

(收稿日期:2024-01-22)

中国知网 https://www.cnki.net