

# 科学教学中模型/模型化方法的认知功能探究

孙可平

**【摘要】** 模型和模型化是现代科学教学中极为引人关注的课题。研究显示,模型和模型化方法对学生学习科学具有非常重要的、潜在的认知功能。各国研究者对该议题进行了大量的研究和探索,尤其是他们对以模型/模型化为基础的科学教学的认知特性具有了更深入的认识和理解。他们所探索的问题和采用的教学策略在一定程度上为改进我国科学教学策略和对策提供了一种方向和启示。

**【关键词】** 科学教育 科学教学 模型和模型化

**【作者简介】** 孙可平/上海师范大学生命与环境科学学院副教授 (上海 200234)

近十几年,模型和模型化正在成为科学和技术教育中的一种教学范式(paradigm),它不仅为科学教育者理解科学探究的心智活动打开了一扇窗户,也为学生学习科学和技术提供了一种方法框架。在科学学习的过程中,学生们应该具有什么样的心智结构和心智活动过程?在以建构主义学习理论作为重要理论基础的科学探究学习中,模型和模型化是我们不得不重视的议题。

## 一、科学模型在科学探究学习过程中的角色

近几年,科学教育和教学领域中频频使用模型和模型化(models and modeling)一词。实际上,模型和模型化并不是一个全新的科学教育词汇,而是它承载了许多科学、教育以及认知领域的新发展和新范式,它的教学价值在科学教育发展过程中被重新认识和理解。

什么是科学的模型和模型化?人们所熟悉的原子和分子模型、人体循环系统的模型、气体中的粒子运动以及宇宙中的黑洞等等都是非常经典的科学模型实例。这些模型都是人们用实物、观念以及数学符号将自然界中的现象和事物表达出来。基于科学哲学、科学史和认知心理学的研究,一些科学及科学教育研究者将模型和模型化广义地描述为:

科学模型是描述一个物体、现象、事件、过程、系统或者某种观念。或者说,科学模型是所研

究的目标事物的一种呈现方式。<sup>[1]</sup>

科学模型是与某种物质现象或者系统相匹配的概念化系统。具体说,科学模型是表达某现象或者系统的结构和功能所呈现的特定图景(pattern),它可能是一种描述、解释或者预测。<sup>[2]</sup>

科学模型也是一种心智存在形式,它是人们依据特定的科学理论所形成的心理图式(schema)。它是人们根据有关世界的知识以及他们建构模型能力建构出来的。<sup>[3]</sup>

科学模型是科学探究过程中的一种有效的研究工具。它是可以产生预测和解释的一个具有呈现方式、规则和推理结构的系统。<sup>[4]</sup>

由这些不同视角的定义可以看出,科学模型和模型化不再仅仅作为一种描述自然世界的科学方法,而强调了人们的心智活动与客观世界关联,或者是科学理论与个人的经验世界的关联。对于科学教育者来说,科学模型是获得对科学概念理解的一条重要途径,它超越了对科学事实、数学方程以及过程的记忆,将学习者对客观事物的感知、相关的知识以及关于事物的解释联系在了一起。

在科学模型界定中,有两个最为突出的特征:一是它呈现了人们建构知识和解决问题过程中心智活动的过程;二来它充分表达了在科学思考过程中理论与方法如何紧密地缠绕在一起、相互作用而共同影响科学知识建构特性。这就是说,通过科学模型的呈现,人们将自己的心智变化与客观的现实世界联系在一起,并且更明确人们的头

脑中是如何将客观世界的各种现象或迹象与科学知识、理论体系相作用。

以模型/模型化为基础的科学教学试图在教学活动中突出科学模型的这种心智发展特性。首先,它强调区分经验世界与科学理论(元概念推理)两个领域之间的差别,强调模型的假说特性以及模型化是一个连续建构的过程。

科学模型和模型化在真实的科学探索和解决问题过程可能表现出多种类型的功能,比如经验模型(实物模型)、理论模型、假说模型、解释模型。其中,科学模型的解释功能描述了从观察客观事物的图景,到理论体系或者想象模型的形成的过程。它不仅仅与科学家所感知的现象世界有关,更重要的是它涉及到科学家所创造的心智模型及其呈现方式,比如气体运动的粒子模型辨识。正因为模型/模型化的解释特征,它受到科学教育者的格外关注,<sup>[5]</sup>它不仅表达了一个科学理论的形成和现象之间的相互关系,也有助于学生真正地认识科学性质。

比如,Mikelskis - Seifert 与 Leisner 的模型/模型化关系图示描述了科学模型在经验世界和理论世界(元概念)之间的相互关系(见图1)。<sup>[6]</sup>在他们的图示中,人们对经验世界的感知与最后形成的精细的元概念推理(理论体系)之间常常通过模型来实现,而且模型世界既代表了模型的存在形式也代表了模型化的过程。

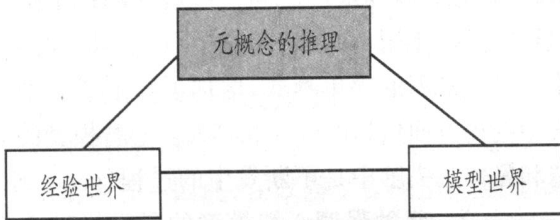


图1 模型和模型化方法的基本观念

另外,一些研究者也强调,在科学教学中必须区分模型/模型化的心智模型与表达模型之间的关系。B. C. Buckley 和 C. J. Boulter 在她们的研究中提出,<sup>[7]</sup>明确心智模型、表达模型、客观现象之间的关系是以模型/模型化为基础学习的前提条件(见图2)。具体地说,心智模型是通过表达模型的形成、使用、精致和修改将客观现象和事实在心智上呈现出来。在科学的学习过程中,心智模型则通过各种科学探究的经验来获得。比

如,从数据或者信息中有目的地建构表达模型、通过类比模型或者现象来进行推理、应用因果关系修改各种假设模型等等。

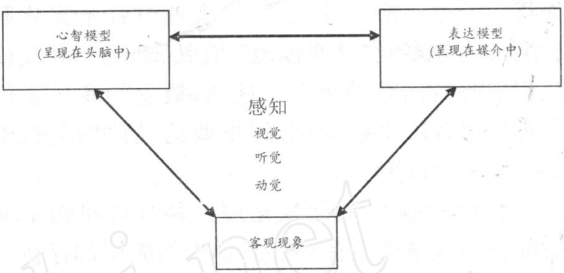


图2 模型和现象之间的相互关系

由此可见,在科学探究学习过程中,科学模型和模型化意义已经被重新解构,它体现了客观事实与科学理论学习之间的深层次关系。目前,以模型和模型化为基础的科学教学强调了学习者在科学探究学习过程中的心智结构的变化,突出了学习者的模型建构过程。而且,科学模型的建构超越了传统科学教学中对观察和实验信息的理解,拓展了科学推理和思考的更宽泛意义。

## 二、以模型和模型化为基础的教学理论框架

近年来,科学教育者一直在努力探索建立以模型和模型化为基础的科学教学范式。其中,三种教学和认知理论对以模型/模型化为基础的科学教学范式的理论框架形成产生了最为关键的作用:一是经典的概念变化理论;二是社会建构学习理论;三是心智模型理论。

正如我们所知,经典的概念变化理论(conceptual change theory)来源于皮亚杰对儿童认知发展的研究以及人们对科学哲学和科学史的研究。<sup>[8]</sup>根据概念变化理论,学生在科学学习过程中经历了一系列的概念变化:学生带着不同的概念水平进入了科学学习过程,其中包括了前概念(pre-conceptions)、选择性概念(alternative conceptions)、错误概念(misconceptions)以及朴素的概念(naïve conceptions)等,经过适当的科学教学(更丰富的心智结构的重新组织),获得有效的科学概念。因此,科学教学的前提便是要促进学生从已有的概念向科学概念转化。

社会建构学习理论则来源于维果茨基的教育心理学思想。根据社会建构学习理论,学习者的

知识建构是通过社会交往而实现的。儿童的实际发展水平与潜在的发展水平之间的“最近发展区”必须通过成人指导或者与有能力的同辈人合作才能得以跨越。换句话说,学习者通过社会文化和社会言语等多元“过滤棱镜”,在协商、共享和交往过程中改变已有的概念。这里,概念的变化不仅是学习者观念的变化,最重要的是他们头脑中心智结构的改变。

然而,经典的概念变化理论和社会建构主义的教育心理学理论在科学教学中的应用都存在一定的局限性。首先,关于经典的概念变化理论的限制。一些研究者提出,<sup>[9]</sup>如果只强调使用认知的方法而不考虑学习的动机因素、社会学习因素以及学习的背景或情境,那么概念变化通常是无效的;还有一些研究者提出,概念变化理论过于强调那些快速发生是大变化或者修改,而没有考虑概念变化过程中的取代变化。

其次,关于社会建构理论在教学中的使用。一直以来,许多研究者都认为,社会建构主义理论缺乏教学实践的经验支持。一则社会建构主义学习观强调学习者与社会交往的内化功能,但是人们对内化的内容和如何内化都没有明确的结论。二则社会建构主义学习观强调由改变学习者错误的概念,可是却无法了解在什么条件下学习者会坚持他们的错误概念。

另外,在西方各国的传统科学教育中人们一直强调科学方法在学校课程中的体现。但是,人们逐渐的发现学校的实践常常扭曲了科学方法在科学调查过程中的角色。<sup>[10]</sup>一些研究者指出,在教育领域中,自杜威以来将科学方法简单地程序化为五个步骤程式的“逻辑思维”,而事实上在真实的科学发现和科学探究过程中科学家并没有使用如此的“科学方法”。研究者们追寻自上世纪六十年代科学教育改革运动以来科学探究学习的发展历程,比如发现法、过程方法等科学教学形式都在一定程度上错误地呈现了调查性的科学探究性质。科学方法在这些科学教学中只作为科学过程被强调,而忽略了科学思考的特性。

因此,科学教育者试图用新的范式来重塑科学课堂中的教学。科学家在真实的科学探究过程中涉及了广泛的活动,他们不仅在使用新实验设备和技能方面改进和变化,也发明新的技术来进

行思想实验(thought experiments),或者依据图书文献进行研究以及使用知识来解决问题。学校科学教育中也需要反映科学家这些重要的探究活动,为此,这些活动整体性的核心便集中于“围绕以证据为基础的解释自然界活动”的科学实践,其中包含了从理论或者模型形成假说的创造性过程,以及用观察和实验的证据来检验和解释。这个科学探究学习的关键是,以一种科学的方式产生新的观念并使其有效。它主张协调科学探究学习的所有认识论特性。

这种科学探究学习的新特性也得到了认知心理学理论的支持。在对科学思维过程的研究中,认知心理学家认为,科学推理不仅包含了归纳和演绎的逻辑思考,也可能通过“心智模型(mental model)”进行推理。<sup>[11]</sup>这个心智模式有些类似知识结构图式(schema),可以作为组织推理信息的心理依据。根据这个假设,心智模型具有三个主要特征:

心智模型在理解和解释经验的过程中不断被积极地建构。

它们经常自动地建构以理解情境的变化以及对未来作出预测(通过这些模型的心智模拟)。

心智模型经常受到人们头脑中关于世界的理论(信念)所限制,而不是通过经验直接获得的。

从这个意义上讲,心智模型可能是科学推理以及科学思考的一种重要形式。心智模型的推理方式与归纳、演绎推理共同在创造性的科学推理过程中发挥作用,而且它超越了以往归纳和演绎推理科学推理的简单程式,增加了在形成模型过程中的多方面信息的选择和判断。心智模型的创造和操作在头脑中是不断发生的过程(generative processes)。这种强调心智模型的科学推理不仅辨明了学习过程中学生头脑内部的心智模型的建构和修改,也考虑了学生在与外界交往的过程中内在心智模型变化和外部信息呈现之间的关系。为此,心智模型的理论为我们理解学生头脑中建构概念的心智模型与课堂上的外部呈现之间的关系提供了可能。

此外,认知心理学家认为,使用心智模型可以进行不明推论形式的推理。麦格那尼(L. Magnani)将不明推论形式的推理看成是在变化的情境中生成新假说的一种“推论的(inferential)”生

成过程。<sup>[12]</sup>他认为,不明推论形式的推理有两个含义:一是它只能够产生“可能合理的(plausible)”假说,或者说具有选择性和创造性的假说;二是它可能通过推论获得最好的解释,也就是说它可以用于评估假说。因此,不明推论形式的推理是科学知识生长的一种重要途径,它超越了原有的推理前提,产生了“选择性的、似乎合理的”推论和解释。

由于心智模型在科学推理过程中特有的作用,以模型/模型化的科学教学被看作是接近科学家建构科学模型的一种重要途径。N. J. Nersessian 将心智模型看成是科学家建构科学模型的心理基础。<sup>[13]</sup>其他的关于科学思考的认知心理学研究也在一定程度上支持了模型/模型化在科学教学中的作用,比如类比、心智模型的形成以及想象的使用等。其中,研究者们提出使用类比模型对不熟悉情境的推理的机理。他们指出,在真实的世界中,使用类比匹配可以创造新的“心智模型”,从而对发生在各种情境中的事物产生预测。尽管已知领域的事物与未知领域事物之间的关系比较复杂,但是科学家建立类比心智模型将有助于他们创造性地解决不同领域的新问题。这就是说,模型的建构者是通过操作动态的“心智模型”来预测新的发现。

如果关于心智模型的这些研究都是正确的,那么对于科学教学来说,学生在科学探究中建构适当的科学模型便具有巨大的潜在功能。那么,学生到底是如何对一个目标概念建构心智模型的?他们如何在课堂背景下处理具有多种选择性概念?科学课堂上,教师如何才能与学生共同建构他们的心智模型?这些问题还没有得到一个公认的回答。因此,在以模型和模型化为基础的科学教学中,认知理论必须与相互作用的社会建构理论和概念变化的教学理论充分综合,真正意义上促进学生现有的概念及头脑中的其它内在资源相互协调,实现有效的知识建构。

### 三、以模型/模型化为基础的科学教学特点

在以模型/模型化为基础的科学教学,最重要是如何让每个学生能够通过内在心智模型的变化达到有关学习目标。现代科学教学的趋势是强调“学生中心”的教学模式,促进学生的观念在教学

过程中获得重新组织和生长。为了在科学课堂中实现模型建构,研究者对科学探究教学的策略进行深入探索。在这些探索中,有三种科学教学形式值得关注:

(1)强调模型/模型化教学的循环过程。在这种科学教学中,科学探究学习的过程被看成是一个模型化的循环过程。这种教学策略主要强调在科学概念学习过程中将模型和模型化作为一个学习循环的基本内容。也就是说,模型/模型化是学习循环过程中的一个重要的中介(mediate learning)学习环节。比如,豪朗(I. A. Holloun)提出了一个结构化的五步模型/模型化学习循环,<sup>[14]</sup>其中包括探索阶段、模型的不确定推论阶段、模型形成、模型的使用以及模型的范式综合(见图3)。

在他的模型中,模型化的学习模型是连续的过程。尽管从结构上看,模型的学习划分为一定阶段,但实际上认知的心智过程却不断发展着。一个新的概念需要激活模型思考时,它并不是马上形成完善的模型,而是经过从名义上的模型向似合理模型、调查模型的形成转变,最后形成适当的范式模型。

另外,在这个学习模型中,对师生的教学活动来说,模型思考的心智活动是通过成果-过程之间互动来实现的,而且必须关注科学探究过程中的反思、控制、自我规范和调整等心智活动的综合使用。当然,学生的心智活动过程必定与教师指导的干预密切相关。教师是整个模型化学习过程中的中枢,他/她承担了帮助学生形成、修改模型以及提供学习“支架”和反馈的责任。在这里,教师的适当辅助提问成为引导学生的关键因素。

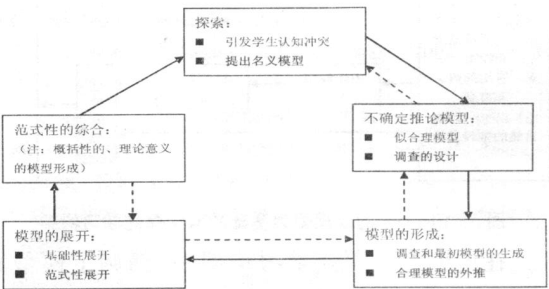


图3 豪朗的科学探究模型/模型化过程示意图

(2)强调模型/模型化教学的师生相互作用。这种教学模型主要强调在科学探究活动中师生共建模型的过程。对于以模型/模型化为基础的科学

学探究教学不仅要求学生能够在学习过程中通过模型推理及改变使他们形成关于事物的心智模型,而且这种教学也要求教师通过对学生学习活动的引导来帮助学生理解模型建构的各种关系。Samia Khan 在其研究中提出师生共建模型/模型化的学习过程:<sup>[15]</sup>

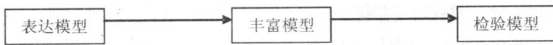


图4 师生共同参与模型/模型化建构的示意图

在这个师生共建模型的过程中,教师让学生首先产生和表达他们头脑中的心智模型,这样才能了解学生已有的概念和心智特征。接下来,教师通过与学生的交流,让他们解释观察到的现象,并用半量化的方式来呈现变量之间的关系。当各种关系随着理解的增加、减少而丰富起来,学生们便会试图通过推论来解释和验证自己提出的模型,他们最初的表达模型便随之形成了他们头脑中的心智模型。这个探究学习过程不同于传统上教师告知学生关于科学模型的教学方式,它更加强调学生自己建构模型。

(3) 强调模型/模型化教学中的心智模型特征。在科学探究教学中,学习者需要根据特定的学习任务,综合各种不同的信息资源(包括结构、功能/行为、因果关系等)不断建构自己的心智模型。从现在的研究来看,科学教学的假设是,<sup>[16]</sup>学生具有特定内容的先行知识作为客观现象的心智模型,然后以此为基础参与到相应的认知活动中。克莱门特(J. Clement)所提出具有特定内容的科学教学模式描绘了学生心智模型的变化过程(见图5):<sup>[17]</sup>

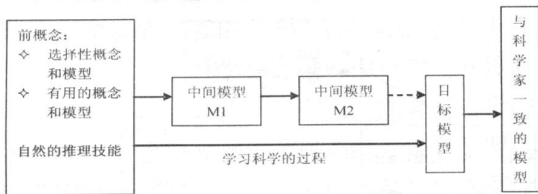


图5 Clement 的以模型为基础的科学探究学习构架

在这个科学探究学习构架中,强调了模型和模型化与学生心智图式(mental schema)发展的重要关系;使用了学生的前概念和自然推理技能、学生自己构建的中间模型、科学教学的目标模型以及与科学家一致的模型等一系列的教学阶段或者过程,以寻求实现模型和模型化的潜在认知功能。

从以上几个以模型/模型化为基础的科学探究学习模式来看,这种教学的基本特征还不是十分清晰,还有很多的教学策略和教学形式有待进一步的探索。但是,以模型/模型化为基础的科学探究教学也体现出其特有的发展学生科学思考方面的功能:

具有更多的科学教学的参数。其中包括诸如不确定现象和数据信息的使用、科学推理的不同途径以及对解释信息的选择和决策等。

心智活动的外部显性化。将“大声思考”的教学策略在科学探究过程中表达出来,使教师能够更有效地理解学生已有的概念和观念。

对科学探究过程更深刻地把握。心智模型通过表达模型、修改模型以及可检验模型被外化,将有助于师生对科学探究活动和科学思考有更深入的理解。

社会建构的因素渗入科学探究活动中。在模型建构的学习中,过程与成果之间的转化、师生的交流和呈现都作为学习的主要因素,进而发展学生的社会技能。

#### 四、对我国科学教育的启示

本文对以模型/模型化为基础的科学探究学习过程的内在认知功能进行了分析。在有关以模型/模型化为基础的科学教学研究中,许多研究者们都相信,模型和模型化在科学教学中具有无可替代的作用。尤其是在倡导以学生为中心的科学探究学习过程中,模型/模型化的科学教学也正扮演着越来越重要的角色。同样,这种科学探究教学模式对我国科学教学的改进也提出了新的挑战和改革方向。

(1) 科学探究活动应强调以学生发展为中心。今天,在我国的科学的学科教育中业已将科学探究活动和过程作为核心目标,<sup>[18]</sup>但在科学课堂中科学探究活动还是一种挑战。师生的关注焦点仍然还以知识理解和考试,科学的学科内容通常是唯一的关注。实际上,学生的科学思维的发展才是科学探究活动的核心,这也是以模型/模型化为基础的科学探究学习的前提。

(2) 科学的教学应该以学生真正的心智发展为核心。虽然我国科学教育界已经实施了一些新的科学教学改革措施,比如对概念转变的科学教

学模式进行了一定有益的探索,<sup>[19]</sup>但是,我们对学生在科学探究过程中的心智变化还缺乏深入的理解和探索。以模型/模型化为基础的科学教学使科学思考显性化,它是我们进一步理解学生心智变化的重要途径。

(3)科学教学应该关注认知发展的社会建构意义。科学探究学习过程中,师生之间的相互作用是教学的一个基本组成部分。在传统科学教学中,以教师的讲授为核心的教学模式严重地阻碍科学探究学习的实施。以什么形式强化科学教学中教师与学生的互动关系?以模型/模型化为基础的科学探究学习为师生之间相互作用提供一种动力教学模式,它可能为我们重新认识科学探究学习中的师生相互作用。

(4)科学教育领域中应该加强对科学探究过程的研究。科学教学是一个复杂的过程。<sup>[20]</sup>它既需要学生直接的经历和不断的参与探究实践,也需要帮助学生建立对科学探究的深刻理解。这便是体验与理解并行。如果缺少对科学过程的深入探索和研究,可能造成理解的简单化。另外,以模型/模型化为基础的科学探究教学还必须在我国科学教学的背景下进行深入的探索,这样才可能变成一种有效的教学策略。

总之,科学教学的改进不是一朝一夕的事情,而是需要我们付出更多的努力来实现的。科学探究教学是科学教育中的一个发展方向,其中的科学探究过程中所使用的策略和方法需要我们深入研究,否则关于科学探究的误解可能使我们的科学教育改革流于形式。

## 参考文献

- [1] J. H. Van Driel and A. E. Van Der Valk. Towards a validated conception of scientific models [C]// R. Printo and D. Couso (eds.), Contributions from Science Education Research. The Netherlands: Springer, 2007:321 - 332.
- [2] [14] I. A. Holloun, Modeling Theory in Science Education [M]. Kluwer Academic Publishers, 2004:1 - 32.
- [3] M. Briggs. Models and modeling: A theory of learning [C]// G. M. Bodner and M. Orgill (eds.), Theoretical Frameworks for Research in Chemistry/Science Education. USA: Pearson Prentice Hall, 2007:72 - 85.
- [4] C. V. Schwarz. Metamodeling knowledge: Developing students' understanding of scientific modeling [J]. Cognition and Instruction, 2005, Vol. 23(2), 165 - 205.
- [5] [9] M. A. Rea - Ramirez, J. J. Clement, and M. C. Ne ú z - Oviedo. An instructional model derived from model construction and criticism theory [C]// J. J. Clement and M. A. Rea - Ramirez (eds.), Model Based Learning and Instruction in Science. Springer, 2008:23 - 43.
- [6] S. Mikelskis - Seifert and A. Leisner. Investigation of effects and stability in teaching model competence [C]// K. Boersma, M. Goedhart, O. De Jong, and H. Eijkelhof (eds.), Research and the Quality of Science Education. The Netherlands: Springer, 2005:337 - 351.
- [7] B. C. Buckley and C. J. Boulter. Investigating the role of representations and expressed models in building mental models [C]// J. K. Gilbert and C. J. Boulter (eds.), Developing Models in Science Education. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000:119 - 135.
- [8] P. Thagard. Conceptual Revolutions, New Jersey: Princeton University Press, 1992.
- [10] M. Windschitl, J. Thompson, & M. Braaten. Beyond the scientific method: Model - based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations [J]. Science Education, 2008, Vol. 92, 941 - 967.
- [11] D. L. Medin, B. H. Ross, & A. B. Markman. Cognitive Psychology [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005:353 - 389.
- [12] L. Magnani. Epistemic mediators and model - based discovery [C]// L. Magnani and N. J. Nersessian, Model - Based Reasoning: Science, Technology, values. New York: Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2002:305 - 329.
- [13] N. J. Nersessian. Model - based reasoning in conceptual change [C]// L. Magnani, N. J. Nersessian and P. Thagard, Model - Based Reasoning in Scientific Discovery. New York: Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 1999:5 - 22.
- [15] S. Khan. Co - construction and model evolution in chemistry [C]// J. J. Clement and M. A. Rea - Ramirez (eds.), Model Based Learning and Instruction in Science. Springer, 2008:59 - 78.
- [16] J. D. Gobert and A. Pallant. Fostering students' epistemologies of models via authentic model - based tasks [J]. Journal of Science Education and Technology, 2004: Vol. 13 (1), 7 - 22.
- [17] J. Clement. Model based learning as a key research area for science education [J]. International Journal of Science Education, 2000: Vol. 22 (9), 1041 - 1053.
- [18] 蔡铁权, 姜旭英. 新编科学教学论 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 27 - 41.
- [19] 任英杰. 影响小学生概念理解的概念生态研究及个案分析 [J]. 全球教育展望, 2009(3): 35 - 39.
- [20] 【美】美国国家研究理事会. 科学探究与国家科学教育标准——教与学的指南 [M]. 罗星凯等译. 北京: 科学普及出版社, 2004:13 - 14.

(责任校对: 胡 陶)