

高中生科学实验能力评价体系的建构与调查研究

张 霄¹ 丁邦平¹ 吴晗清^{1,2}

(1. 首都师范大学教育学院, 北京 100037;

2. 首都师范大学化学教育研究所, 北京 100048)

[摘 要] 实验教学是科学教育的重要组成部分。通过文献研究, 结合教学实践, 建构了实验能力的评价体系, 并以此对北京市 6 所中学的 364 名学生进行了调查研究。结果表明: 学生实验能力的总体发展水平不高, 不同类型学校之间无显著差异, 其中实施方案的能力显著高于设计方案及分析结果的能力; 在设计方案维度下, 能力差异显著, 由强到弱依次为选择药品和仪器的能力、明确实验条件的能力、设计操作步骤的能力; 在实施方案维度中, 学生操作能力和观察能力显著高于调控实验变量的能力和记录能力; 在分析结果维度下, 学生的交流合作能力显著高于解释推理能力和反思能力。男女性别没有显著差异。基于此本文提出了相应的实验教学建议。

[关键词] 实验能力; 评价体系; 调查研究; 高中生

[中图分类号] G526.5

[文献标志码] A

[文章编号] 1002-1477(2017)02-0089-06

一、实验能力评价体系的建构

要准确地分析与诊断实验教学中存在的问题, 需要建构合理的实验能力评价体系。良好的评价体系应当满足以下三个功能: 总结性功能, 即能够描述学生的总体水平; 形成性功能, 即能够诊断教学中存在的缺陷; 评价功能, 即向教师提供课堂教学效果的相关信息, 促进教学的改革。^[1] 综合分析国内外的相关文献, 学生实验能力评价体系可分为宏观和微观两种类型。宏观类型即从认知、技术、情感(国内多使用知识、过程与方法、情感态度)等维度, 对学生的实验能力进行整体性评价; 微观类型即主要针对技术层面进行评价, 技术不仅包括动手操作的能力, 也包括较为高级的迁移能力, 如观察、实施、预测、推理等。^[2] 本文建构的实验能力体系倾向于对学生实验能力进行微观考察, 即针对设计实验方案、实施方案设计、分析实验结果等实验能力进行深入分析。具体内容如表 1 所示。

表 1 实验能力体系及具体内容

一级指标	二级指标	能力内容
设计实验方案	选择药品和仪器	把握药品和实验仪器的用途和特征; 选择实验所需药品和仪器; 选择最优方案
	明确实验条件	判断需要控制的条件; 知道如何控制条件; 选择最为合理的方案
	设计操作步骤	判断完成实验需要的步骤; 设计实验步骤; 评估设计的实验步骤
实施方案设计	动手操作	完成搭建实验装置、药品取用、产物收集等工作; 按照实验操作规范完成实验; 解决实验中出现的临时状况
	调控实验变量	对变量加以控制; 准确调节无关变量; 通过多次实验获得实验结果
	观察	明确需要观察的对象; 按顺序、按主次观察实验; 将观察到的现象与知识加以联系
	记录	明确记录的内容; 准确、全面地记录实验中出现的有用信息; 使用规范的术语记录
分析实验结果	解释推理	用学过的知识解释实验现象; 从不同角度进行解释; 解释推理预测外现象
	合作交流	合作完成实验; 交流自己的观点与实验结果; 交流实验报告的内容
	反思	反思实验设计和实施过程; 反思指导实验的理论; 优化实验设计

[收稿日期] 2016-02-25

[基金项目] 全国教育科学规划教育部重点课题(DHA130257)。

[作者简介] 张霄(1991—), 男, 博士研究生; 丁邦平(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主任; **[通讯作者]** 吴晗清(1981—), 男, 教育学博士, 心理学博士后。

二、学生实验能力的调查研究

综合国内外实验能力评价体系,初步编制问卷并进行前测。对前测问卷进行项目分析,删除无效题目。进行探索性因素分析,KMO 指数为 0.974(>0.7),Bartlett's 球形检验达到显著水平,Sig 为 0.00(<0.05),解释积累的总方差为 68.595%($>50\%$),表明适合进行因子分析。使用主成分分析法,配合最大变异法进行旋转成分矩阵分析,萃取三个共同因素,旋转成分矩阵重新标注的成分与原问卷题目高度一致,确定正式问卷。正式问卷共包括设计实验方案能力、实施实验方案能力、分析实验结果能力(表格中分别用维度 1、维度 2、维度 3 代称)三个维度,30 道小题。问卷选项为“1”非常不符合、“2”比较不符合、“3”一般、“4”比较符合、“5”非常符合,分别记 1~5 分。用 SPSS 软件计算内部一致性系数 α 值,问卷 α 值为 0.926(>0.8),表明问卷信度良好。

调查选取北京市 6 所中学(其中包括:2 所市级示范校,文中用 A1 和 A2 代称;2 所区级示范校,文中用 B1 和 B2 代称;2 所普通校,文中用 C1 和 C2 代称)的高一年级学生,发放问卷 400 份,有效问卷 364 份,有效率为 91%。其中男生 198 人,女生 166 人。以本文建构的实验能力评价体系为基础,设计访谈提纲,对教师进行访谈。在高一阶段,学生主要以完成化学实验为主,因此主要针对化学教师进行访谈。

1. 学生实验能力的整体发展水平及六所学校之间的差异

计算上述三个维度的学生得分均值,具体如表 2 所示。

表 2 学生实验能力在三个维度上的均值

维度	均值	95%置信区间	
		下限	上限
1	3.614	3.532	3.696
2	3.745	3.669	3.821
3	3.658	3.582	3.734

调查结果表明,学生实验能力的总体发展水平不高,介于“一般”和“比较好”之间,并且六所学校学生的实验能力总体上没有显著差异,因此,实验教学效果不佳是普遍存在的问题。通过大量课堂观察与教师访谈发现,实验教学基本遵循着“食谱”式的教学流程,即先由教师讲解实验涉及的知识原理、操作流程、注意事项等内容,再由学生动手完成实验,最后教师分析解释实验现象,总结实验中需要注意的内容。这种教学模式在很大程度上限制了学生实验能力的发展。

六所学校的学生实验水平总体上并无显著差异,其中 B2 和 C2 两所学校学生的实验能力发展水平相对较高,学校 A2 相对较低。学校 B2 在设计实验方案能力和实施实验方案能力两个维度显著高于学校 A2(Sig 分别为 0.014 和 0.004),学校 C3 在分析实验结果能力维度显著高于学校 A2(Sig 为 0.035)。通过对 A2、B2 和 C2 三所学校的教师进行访谈发现,学生实验能力的发展水平与参与、完成实验的机会有直接关系。

访谈教师“您认为学生参与、完成实验的机会多吗?”A2、B2 和 C2 三所学校的教师回答差异很大。教师 A2“相当一部分学生在初中阶段动手完成实验的机会比较少,很多学生将实验视为单纯记忆的知识内容。”学校 A2 的学生是来自我国各地区的少数民族学生,由于民族文化、教学风格、硬件设施等因素的差异,导致学生对于理论知识的学习能力相对较强,但进入实验室完成实验的机会比较少,因此实验能力比其他学校相对较低。而教师 B2 则表示“除了书上要求的实验外,偶尔会拓展教材上没有的实验。比如萃取分液,学生们开始认为只有有颜色的能够分层,所以追加了这个实验,让学生明确萃取与颜色无关。”教师 C2 也表示“教材常规的实验都是在实验室完成的。”

可见,学生的实验能力与参与、完成实验的机会有着密切关系。此外,教师对于实验教学的关注程度也是影响学生实验能力发展水平的重要因素。当问及教师“您如何准备一节实验课”时,A2、B2 和 C2 三位教师的回答截然不同。教师 A2 认为“实验课相对容易,只要想好实验的目的、过程、内容、设问以及学生可能出现的问题,就差不多了。”相比于教师 A2、B2 和 C2 两位教师对于实验教学的关注程度更

高,教师 B2 表示“提前一周向负责实验室的教师说明,挑选一下哪些实验由学生完成、哪些是演示实验,再和学生说明预习实验册。备课时会和其他教师商量一下,再向实验室教师请教,在操作上提一些意见,根据实验的难度安排实验的顺序。”教师 C2 在实验教学上花费更多的时间与精力,“一节实验课的准备,耗时是普通课的五倍,一般从开始筹划到上课至少需要一周的时间,我和实验员反复尝试每个细节,预测可能的意外,并尽量做好预设准备。”这也能够解释,为何学校 C2 作为一所普通校,学生的实验能力超越了调查中的区级示范校和市级示范校。

在日常教学中,教师 C2 会将练习题中出现的实验,设计成为探究式实验并让学生自主完成探究过程,深化对理论知识的学习与理解。诚然,学生基础是实验能力培养的重要因素,但如果教师能够尽可能地为学生提供动手完成实验的机会,并提高自身对实验教学的关注程度,学生的实验能力能够得到良好发展。

2. 学生实验能力一级指标各维度的发展水平

对设计实验方案能力、实施方案设计能力、分析实验结果能力三个维度进行重复测量方差分析,经主体内效应的检验, $F=15.767$,Sig 为 0.000(具体如表 3 所示)。

表 3 学生实验能力一级指标三个维度的水平差异

序号	维度	均值差值	标准误差	Sig ^b
1	2	-0.131 *	0.023	0
	3	-0.044	0.026	0.091
2	1	0.131 *	0.023	0
	3	0.087 *	0.022	0
3	1	0.044	0.026	0.091
	2	-0.087 *	0.022	0

注: * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$ 。b. 对多个比较的调整: 最不显著差别(相当于未作调整),下同。

调查结果表明,学生实施方案设计的能力显著高于设计实验方案和分析实验结果的能力。对六所学校进行单因素方差分析,结果表明:学校 B2 和 C2 的学生在设计实验方案能力的发展水平高于其他学校。结果与课堂观察和教师访谈获得的经验性结论高度吻合。在实验教学中,设计实验方案和分析实验结果两个过程通常由教师“代劳”,有时甚至被忽略。通过教师访谈发现,学生设计实验方案的能力与教师对学生的认知程度以及实验教学方式有很大关系。相比于其他教师,教师 B2 和教师 C2 经常鼓励学生自主设计并完成实验。访谈教师“您会引导学生自主设计实验吗?”只有 B2 和 C2 两位教师给出了肯定的答案。教师 B2 表示“在讲新课的过程中会让学生提出实验的假设。在实验室做实验的时候,个别组可能会用给定的药品自主设计一些实验。如果可行,我就鼓励学生直接完成,只要有可实施的意义我都会让学生们自己做一下。”与之类似,教师 C2 也表示“复杂实验,比如四氧化三铁中的离子检验,上课后会先让学生讨论并设计实验。学生设计的实验大概占一半。部分学生会按照自己的想法完成实验,安全范围内都是鼓励的。”但相当一部分教师认为学生缺乏自主设计实验的能力,因此在实验教学过程中,倾向于直接告知学生应当完成的具体操作。如教师 C1 表示“学生在高一阶段完成不了一个完整的设计实验过程,只能够引导学生下一步应当做什么。”其他教师也表示“学生缺乏设计实验的能力,肯定设计不出来,学生把正确的理解了就已经很不错了,有很多学生连正确的都不理解。”

学生设计实验方案的能力较低,与教师对学生的认知以及实验教学方式密切相关。提高学生设计实验方案的能力,一方面教师应当相信学生有能力完成实验设计,如果因为担心学生缺乏能力,而剥夺了学生自主设计实验的机会,那么学生设计实验方案的能力注定无法得到提升;另一方面,教师应当尽可能为学生提供设计实验方案的机会,鼓励学生根据实验目的,大胆地设计实验,再通过严谨分析判断实验方案的合理性与可行性。在引导学生完成实验设计的过程中,教师可以遵循由易到难的原则,先引导学生对原理明确、操作简单、现象明显的实验进行设计,当学生能够顺利完成这一过程后,在原有实验的基础上逐渐增大难度,进一步提升学生设计实验方案能力。

3. 学生实验能力二级指标各维度的发展水平

(1) 学生选取药品和仪器的能力、对条件的控制能力、明确操作步骤能力的发展水平。对维度 1 中选取药品和仪器的能力、对条件的控制能力、明确操作步骤的能力, 三项二级指标进行重复测量方差分析, 经主体内效应的检验, $F=14.766$, Sig 为 0.000(具体如表 4 所示)。结果表明, 在设计实验方案维度下, 学生选择药品和仪器的能力显著高于明确实验条件的能力, 明确实验条件的能力显著高于设计操作步骤的能力。由此可见, 学生对于实验药品、仪器、条件等陈述性知识的掌握程度较高, 而对于设计操作步骤的程序性和策略性知识的掌握程度相对较低。这一结果符合个体的认知规律, 也符合高中化学课程内容的设置规律。人教版化学教材必修一第一章, 即涉及仪器和药品的使用, 在教学过程中教师通常会为学生呈现相应的实验药品及仪器, 供学生学习。学生设计操作步骤的能力较低, 与教师的实验教学方式有很大关系。通过访谈发现, 绝大部分教师会在学生动手完成实验以前为学生呈现明确的实验步骤。访谈教师“在实验教学中, 您如何向学生讲解实验步骤?” 绝大部分教师表示会为学生直接呈现实验步骤。如教师 B2 表示“一般都是实验前让学生写实验报告册, 上面会有一些问题, 选择药品是学生预习的, 进实验室我只是提示一下实验的步骤。”教师 C1 也表示“无论是探究性实验还是验证性实验, 反正实验步骤都是要告诉学生的。”还有些教师甚至认为准备实验课的过程就是为学生明确实验步骤的过程, “准备实验课主要是做 PPT, 包括实验目的、实验步骤和实验结论。尤其是实验步骤, 学生应该如何做一定要写清楚。”可见, 在完成实验的过程中, 学生通常只需要“照方抓药”, 按照教师给出的实验步骤顺利完成实验即可。教师则通常作为“监督者”, 严格观察学生是否按照既定的操作步骤完成实验。因此学生很少有机会参与完成实验操作步骤的设计, 导致学生这一能力发展水平较低。

表 4 学生实验能力维度 1 中二级指标的水平差异

项目	维度 1	均值差值	标准误差	Sig ^b
选择药品、仪器	明确实验条件	0.179*	0.071	0.013
	设计操作步骤	0.549*	0.086	0
明确实验条件	选择药品、仪器	-0.179*	0.071	0.013
	设计操作步骤	0.371*	0.073	0
设计操作步骤	选择药品、仪器	-0.549*	0.086	0
	明确实验条件	-0.371*	0.073	0

(2) 学生动手操作的能力、调控能力、观察能力、记录能力的发展水平。对维度 2 中动手操作的能力、调控能力、观察能力、记录能力, 四项二级指标进行重复测量方差分析, 经主体内效应的检验, $F=16.886$, Sig 为 0.000(具体如表 5 所示)。结果表明, 在实施方案设计维度下, 学生动手操作能力和观察能力显著高于调控实验变量的能力和记录能力。通过上述分析可知, 在实验教学过程中, 教师会向学生呈现实验的详细步骤, 并在完成实验的过程中格外关注学生的操作情况, 因此学生动手操作能力发展水平较高。值得注意的是, 学生对于实验的观察与记录能力存在显著性差异。这一结果与实验现象的标准化有关, 即学生能够自主观察实验现象, 但记录的内容要以教师公布的“标准现象”为准。当问及教师“您如何引导学生观察和记录现象? 当学生观察到的现象与您想让学生记录的现象不一致时, 您会如何处理?” 多数教师表示无论学生观察到何种内容, 都会要求学生记录标准的实验现象。如教师 A1 表示“实验报告册上面有让学生填写实验现象的填空, 我会在备课的时候看教参上的标准答案, 无论实验成功了没有, 我都让学生记录标准答案, 或者让学生看视频实验, 视频中的现象一般是很标准的。”教师 B1 则表示“个别人的现象不同就忽略它, 不用花太多的时间处理这个问题。学生自己先写一个现象, 教师再给出一个标准的写法, 学生按照标准的修改自己写的。”由此可见, 在完成实验的过程中, 学生通常无法将自己观察到的现象予以真实、准确地记录。例如分析实验报告发现, 学生经常将褪色或变为无色记录为无明显现象。对实验现象予以过分标准化, 导致记录过程变为“听写”过程, 学生没有机会检验记录的内容是否合理。如此一来, 学生的记录能力并没有获得良好的训练。教师在检查学生实验报告的完成情况时, 应当分析学生在记录现象时出现的问题, 并予以及时反馈与评价。

表 5 学生实验能力维度 2 中二级指标的水平差异

项目	维度 2	均值差值	标准误差	Sig ^b
动手操作	调控实验变量	0.470 [*]	0.09	0
	观察	0.069	0.097	0.478
	记录	0.475 [*]	0.111	0
调控实验变量	动手操作	-0.470 [*]	0.09	0
	观察	-0.401 [*]	0.077	0
	记录	0.005	0.086	0.949
观察	动手操作	-0.069	0.097	0.478
	调控实验变量	0.401 [*]	0.077	0
	记录	0.407 [*]	0.083	0
记录	动手操作	-0.475 [*]	0.111	0
	调控实验变量	-0.005	0.086	0.949
	观察	-0.407 [*]	0.083	0

(3) 学生解释和推理能力、交流合作能力、反思能力的发展水平。对维度 3 解释和推理能力、交流合作能力、反思能力, 三项二级指标进行重复测量方差分析, 经主体内效应的检验, $F=8.098$, Sig 为 0.000(具体如表 6 所示)。结果表明, 在分析实验结果维度下, 学生的交流合作能力显著高于解释推理能力和反思能力, 其中实验反思能力发展水平最低。反思即对实验方案、过程、结果的再思考, 旨在发掘实验过程中的纰漏之处, 对实验加以优化和改进。访谈教师“实验结束后, 您会引导学生对实验进行反思或优化吗?”多数教师表示不会引导学生完成上述过程。例如教师 A1 表示“讲新课的时候没有, 习题里面会对实验改进。对于实验本身学生都不一定能够学懂, 实验反思与优化还要再高一个层次, 也不一定懂。”教师 A2 表示“对于实验方案的优化探讨的不是特别多, 有时在习题册上遇到优化的问题会拿出来探讨一下, 而在实验课上对于实验的优化问题探讨的比较少。”由此可见, 学生实验反思能力发展水平不高, 原因在于教师对其关注程度较低。实际上, 对于实验的反思与优化, 教师完全可以在实验室中引导学生共同完成。一方面, 教师应当引导学生以批判的眼光看待实验获得的结果, 突破“标准现象”的桎梏, 尝试对预设外现象或结果加以探讨; 另一方面, 教师应当引导学生发现实验中存在的不足, 尝试对实验的要因、条件、装置、操作过程等内容加以改进, 以更加简便的方式获得更加具有说服力的实验结果。“实验操作过程优化就是在改进与创新实验时, 对传统实验操作过程进行简化与优化, 实验过程的合理化、科学化是实验顺利完成的保证。”^[3]

表 6 学生实验能力维度 3 中二级指标的水平差异

项目	维度 3	均值差值	标准误差	Sig ^b
解释推理	交流合作	-0.275 [*]	0.082	0.001
	反思	0.03	0.08	0.707
交流合作	解释推理	0.275 [*]	0.082	0.001
	反思	0.305 [*]	0.083	0
反思	解释推理	-0.03	0.08	0.707
	交流合作	-0.305 [*]	0.083	0

(4) 男生和女生在学生实验能力上的差异。对男女学生的实验能力进行独立样本 t 检验, 数据分析结果表明, 男生和女生在实验能力的三个维度上, 均不存在显著性差异, 因此男女学生都应当有信心提高自身的实验能力。

三、对实验教学的建议

1. 实践性: 无论何种类型的学校, 都应当合理增加学生亲自参与、完成实验的机会

调查结果表明, 学生实验能力的发展水平与学校的整体水平并无显著相关性, 但与学生参与、完成

实验的机会密切相关。总体而言,学生参与、完成实验的机会越多,实验能力发展水平越高。需要指明的是,这里的参与主要指“脑力参与”(mind-on),即学生在自主完成实验或观察演示实验的过程中,对实验的关注与思考。诚然,在教学实践中,实验教学会遇到多方阻碍,如课时、实验室条件等,实际上,这些因素完全可以通过教师的努力予以克服。例如调查中教师 B2 尝试将学生容易混淆的知识点设计成实验,并在理论课中予以实施,不仅能够克服实验课时紧张的问题,同时还能够通过实验的方式加深学生对理论知识的理解。在完成实验的过程中,教师不仅应当关注学生的动手操作情况,更应该对学生的思考情况加以观察与反馈。学生是否真正地参与其中,可以通过观察其实验操作的娴熟程度、对预设外现象的解释、对实验结果的反思等,予以判断。因此,提高学生的实验能力,增加学生参与、完成实验的机会是基础条件。

2. 系统性:鼓励学生大胆尝试进行系统的实验设计,从源头上拒绝照单抓药的机械模式

调查结果表明,学生实施方案设计的能力显著高于设计实验方案和分析实验结果的能力。在设计实验方案维度下,学生设计操作步骤的能力发展水平最低。访谈结果显示,相当一部分教师会为学生呈现明确的实验步骤,并在实验过程中,严格地“监督”学生是否按照既定步骤完成实验。这一过程在很大程度上削减了学生自主完成实验的空间,导致学生设计实验方案和分析实验结果能力的发展水平不高。因此,在实验教学的过程中,教师应当尝试归还原本属于学生的实验空间,在安全的范围内,鼓励学生大胆进行尝试。同时,教师也应当对自身的实验观进行反思,实验观即教师看待实验的角度与观点,如果教师仅仅将实验视为验证理论知识的工具,则倾向于将实验视为不可更易的权威性内容,实际上“科学实验在一定程度上是依赖理论的,而且是可错的、可修正的……必须承认,理论与实践的关系陷入某种循环论证的可能性是存在的。”^[4]实验与理论知识之间存在一定张力,教师应当引导学生思考实验的可行性与有效性,尝试对实验过程与结果进行批判与反思。

3. 创新性:给予学生独立自主的时间和空间,增强实验的个人独创性

调查结果表明,学生选择药品和仪器的能力显著高于明确实验条件的能力,设计操作步骤的能力最低;动手操作能力和观察能力显著高于调控实验变量的能力和记录能力;交流合作能力显著高于解释推理能力和反思能力。由此可见,学生的实验能力发展并不均衡。在传统的实验教学中,教师通常以教学内容为中心,强调实验过程、操作、现象、结论的权威性,学生仅需要完成对相关内容的机械重复和记忆即可。如此一来,学生与实验内容相关的能力,如动手操作能力、观察能力、合作交流能力等发展水平相对较高,而需要发挥学生主观能动性才能够得以发展的能力,如调控实验变量的能力、记录能力、解释推理能力、反思能力等,则发展水平相对较低。以学生为中心与“诊断性教学”概念相吻合。^[5]在准备实验课的过程中,教师除了要对实验本身加以准备,更重要的是要对学生的自身经验加以分析,以学生的自身能力为基础,充分发挥学生的主观能动性,促进学生实验能力全面地、动态地发展。

综上所述,提升学生的实验能力是科学教育中最为重要,同时也是最具挑战性的任务之一。调查结果表明学生的实验能力总体发展水平不高,尚有很大的提升空间。因此如何对实验教学进行改革,全面提升学生的实验能力,值得每一位教育工作者深思。

[参考文献]

- [1] ABRAHAM I, REISS M J, SHARPE R M. The assessment of practical work in school science[J]. Studies in Science Education, 2013, 49(2): 209-251.
- [2] WELLINGTON J. Practical work in school science: which way now? [M]. London: Routledge, 2002.
- [3] 蔡铁权, 藏文斌, 姜旭英. 科学实验教学研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2008: 216
- [4] 查尔莫斯 A. F. 科学究竟是什么[M]. 鲁旭东, 译. 北京: 商务印书馆, 2013: 52
- [5] 约翰·D·布兰克福特. 人是如何学习的: 大脑、心理、经验及学校[M]. 程可拉, 孙亚玲, 王旭卿, 译. 上海: 华东师范大学出版社, 2012: 135.

[责任编辑: 陈学涛]