

《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：动作化学习的有效性及其影响机制

作者：匡子翌，祝婉玲，成美霞，王福兴，胡祥恩

第一轮

审稿人 1 意见：

该文将各个研究的效应量 Cohen's d 值进行汇总后求出效应量中位数(median effect size)，并基于该值分析生成演示学习策略的有效性，方法可取；并具体给出了初步探讨了不同研究结论矛盾的原因，对未来生成演示学习研究提供参考。研究结果对课堂教学实践有指导作用。研究有理论和实践意义。但作者自检报告和文章尚有如下问题，供作者参考：

意见 1：作者自检报告中提及参考文献以近五年为主，但根据作者呈现的百分比来看

2018-2022 参考文献占比 33%，2013 年前占 40%，显然五年前文献多于近五年的文献。

回应：非常感谢您提出的意见！由于我们的疏忽，近五年的研究占比 33%，表述为“参考文献以近五年为主”确实欠缺妥当，我们将自检报告的表述进行了修改，同时补充了原因。

“自检报告 6”补充：

.....造成本文中五年前文献较多的原因是由如下两个方面的原因所致：第一，本文涉及的三个理论尤其具身认知理论和认知负荷理论都是比较早的理论，引用的经典文献基本都在 2013 年以前。其次，本文关注的最重要核心是动作化学习能不能促进学习，这些研究在近五年相对较多。即关注有动作化学习和无动作化学习的对比效果，其中 2018-2022 的研究有 9 篇(41%)，2013-2017 的有 4 篇(18%)，2013 以前的研究有 9 篇(41%)，从趋势而言近五年该领域越来越受到研究者的关注。然而，关注实物动作化学习和虚拟动作化学习的比较的研究多出现在 17 年以前，这些研究没有考虑有动作化学习是否比无动作化学习更有效，从表 2 可知，仅有 3 篇(13%)源于近五年，8 篇(33%)来自 13-17 年，13 年以前的有 13 篇(54%)，这是造成总体 13 年以前文献比较多的原因。我们为了更加全面地分析动作化学习的研究，因此也将实物动作化学习和虚拟动作化学习比较的研究罗列到表 2 进行了单独的分析，但这可能造成了近五年研究占比数量较少。

总之，虽然近五年研究占比为 33%，但 learning by enacting 从 2015 年才被提出，研究领域仍存在较多问题尚未厘清，目前尚未有类似的综述对此进行探讨，因此，本研究基于

learning by enacting 出发系统地搜集以往的文献和分析，具有一定的价值，可为教学设计者和研究者了解动作化学习提供参考。

意见 2：文中“由于以往研究的实验设计大多只是将实物教学模型和虚拟教学模型进行单独对比，没有设立对照组（即不操作教学模型）。因此本文将单独归纳实物模型和虚拟模型对比的研究，探讨二者谁更能够提升学生的学习效果。”此段话表述不够清晰明白，容易使人误解为本研究与已有的研究没有差异。

回应：感谢专家的意见！我们对此句进行了重写，提高可读性。将“1 动作化学习的分类”最后一句内容更改为“但目前的实证研究中实物动作化学习和虚拟动作化学习谁更能够促进学习成绩？本文单独汇总了实物动作化学习和虚拟动作化学习对比的研究（见表 2），即将实物动作化学习作为实验组，虚拟动作化学习作为控制组，比较两种动作化学习对学习效果的影响。”

意见 3：作者自检报告中“实物生成演示和虚拟生成演示在保持测验($d_{\text{保持}} = 0.01$)与迁移测验表现出相似的积极作用($d_{\text{迁移}} = 0.01$)。”根据全文读者能明白作者意思，但单独看这句话感觉有歧义。不知在此句中效应值是对积极作用的说明，还是对相似作用的说明？

回应：感谢审稿专家细致的审阅！此句意在表明实物动作化学习和虚拟动作化学习具有相似的作用，但二者都比无动作化学习好，因此具有积极作用。由于效应量呈现的只是实物动作化学习和虚拟动作化学习相比的效应量中值，可能造成了歧义，此次修改中我们将其更改为“实物生成演示和虚拟生成演示在保持测验($d_{\text{保持}} = 0.01$)与迁移测验($d_{\text{迁移}} = 0.01$)上没有差异”

意见 4：摘要中“在主观体验方面，生成演示促进了学习兴趣($d_{\text{学习兴趣}} = 0.21$)”， d 为小效应，作者表述是否精准？

回应：非常感谢专家的意见！我们将其更改为更为精准的表述“在主观体验方面，动作化学习促进学习兴趣具有小的促进效应”。

意见 5：2.2 第二段由于表述问题，不知效应量 $d = 0.01$ 是作者计算的，还是原有研究中的？读者猜测后才知道作者意图，希望作者表述更明确。从 2.2 第一段来看可以得出作者写的“实物生成演示和虚拟生成演示都可以提升学习效果”结论，但从第二段“实物生成演示促进保持测验的效应量 $d = 0.01$ ，实物生成演示促进迁移测验的效应量 $d = 0.01$ ”表述中效应值来看，

实物演示生成的积极作用可忽略不计。而作者总结中又提及“实物生成演示比虚拟生成演示在保持测验($d_{\text{保持}} = 0.01$)与迁移测验上没有差异($d_{\text{迁移}} = 0.01$)。”不知作者如何看待这前后不一致现象？或者是作者表述问题引起读者歧义或困惑？

回应：感谢审稿专家提出的问题！2.2 中第二段中的 $d = 0.01$ 为效应量中值，是由我们汇总以往效应量后求中位数所得，即实物动作化学习相比虚拟动作化学习相比，实物动作化学习促进保持测验和迁移测验的效应量中值。由于我们表述的问题将“效应量中值”描述为“效应量”，产生了歧义，我们对此进行了更改。

此外，2.2 第一段“实物生成演示和虚拟生成演示都可以提升学习效果”与 2.2 中第二段“实物生成演示促进保持测验的效应量 $d = 0.01$ ，实物生成演示促进迁移测验的效应量 $d = 0.01$ ”以及总结中提及的“实物生成演示比虚拟生成演示在保持测验($d_{\text{保持}} = 0.01$)与迁移测验上没有差异($d_{\text{迁移}} = 0.01$)”描述的是同一个含义。2.2 第二段分析中将实物动作化学习作为实验组，而将虚拟动作化作为控制组，通过我们的计算发现实物动作化学习相比于虚拟动作化学习在保持和迁移成绩上都没有差异 ($d_{\text{保持}} = 0.01$, $d_{\text{迁移}} = 0.01$)。因此，实物动作化学习的促进迁移测验的效应为 $d = 0.01$ （这是相对于虚拟动作化学习而言）。基于 2.1 和 2.2 第一段的分析，我们将无动作化学习作为控制组，动作化学习（包括实物和虚拟两种）作为实验组，发现动作化学习是要显著的促进保持和迁移成绩的，这表明虽然实物和虚拟两种动作化学习之间没有差异，但“实物动作化学习和虚拟动作化学习都可以提升学习效果”。为了防止产生歧义，我们删除了两种动作化学习都可以提升学习结果的表述，将所有内容都表述为两种动作化学习在保持和迁移成绩上没有差异。

意见 6：推论的严谨性：2.2 第二段中只计算了实物生成演示的效应量，未计算虚拟演示生成的效应量或二者对比的效应量。能否得出“两者之间没差别”的结论。

回应：非常感谢审稿专家的意见！2.2 第二段分析中将实物动作化学习作为实验组，而将虚拟动作化作为控制组，因此得出的是实物动作化学习和虚拟动作化学习对比的效应量中值。这可能是由于我们在 2.2 第一段中将动作化学习（包括实物和虚拟两种）作为实验组，无动作化学习作为控制组，在第二段中没有清晰地提及实验组和控制组的更换，因此我们在第一段末尾增加了表述以避免歧义。

“2.2 第一段末尾”补充：

...因此，后续分析将实物动作化学习作为实验组，虚拟动作化学习作为控制组进行比较。

意见 7：细节：3 最后一句话有漏字。

回应：感谢审稿人的意见！我们将此句进行了修改，更正为“以往研究均采用被试间实验设计，因此被试仅能对一个条件进行评价，这可能导致结果有偏(Wilson et al., 2018)。”同时作者反复通读了全文，确保无错字漏字。

审稿人 2 意见：

这是一篇质量较高的综述性文章。作者围绕 learning by enacting 这一主题，充分地收集了相关文献，并做了相对较为细致的分析，得出了一些重要的结论。但文章存在如下明显的需要修改的地方：

意见 1：把“learning by enacting”翻译成“生成演示学习”有些不妥。“learning by enacting”本质上是借助于动作辅助而进行的学习，这一思想的源头可以追溯到蒙台梭利、杜威、皮亚杰的思想，班杜拉用“enactive leaning”(我们把它译为亲历学习)来指代与观察学习相对应的学习形式，本意是指亲身参与的学习，这些思想后来被具身认知理论所吸纳。R. Mayer 团队在研究“learning by enacting”时，有时会把它纳入多媒体学习的“具身化原则”中。综合当前已有的研究，我们觉得把“learning by enacting”译成“动作化学习”可能较为恰当。

回应：非常感谢审稿专家的建设性意见！我们十分赞同审稿专家将“learning by enacting”译为“动作化学习”，这让“learning by enacting”的含义更加直观。因此，我们将标题，摘要和正文中的“生成演示学习”都进行了相应的替换。此外，我们将您提及的相关背景知识也放到了引言中，让读者更好地了解“learning by enacting”的起源。

“正文第一段”补充：

.....“enact”一词最早可追溯到 Bandura(1986; 1997)所提出的亲历学习(enactive learning)，意指亲身参与的学习，用来指代与观察学习相对应的学习形式，这些思想后来被具身认知理论（embodied cognition theory, ECT）所吸纳。Fiorella 和 Mayer (2015)在此概念基础上提出了动作化学习的概念，进一步强调了学习者身体动作对学习的影响。

参考文献

Bandura, A. (1986). *Social foundations of thought and action: A social cognitive theory*. Prentice-Hall.

Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W. H. Freeman & Co.

Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity: Eight learning strategies that promote*

意见 2: 作者在文章中参照 R. Mayer 团队的做法, 采用效应量中位数来反映各种动作化学习的效果, 并把相关的效应量在摘要部分呈现, 这有些冒险。事实上, Mayer 团队之所以这样做, 是因为他们的研究是一个系列, 被试和实验情境都高度相似。如果本文中选取的效应量来自不同的被试群体 (特别是不同年龄的)、基于明显不同的学习情境、采用不同的研究范式得出, 利用中位数效应量反映学习策略的效果就显得有些冒险。因此建议论文至少在正文中略微详细地交待一下这些中位数来源, 并且不要在摘要中直接列出效应值。

回应: 非常感谢审稿专家特别有深度和建设性的意见! 确实如专家所言, 利用中位数效应量可能存在一定的偏差, 我们根据您的意见在正文中提及了一些效应量中位数的来源以及相关的文献, 阐述使用效应量中值的原因。并在将效应量中值可能存在的问题放入不足和展望中。同时在摘要中剔除了效应值。再次对这个意见表示感谢, 也让作者通过这次审稿交流学到了很多知识。

具体修改如下:

“2.1 动作化学习好于无动作化学习吗?”中补充

为了系统地量化以往研究的结果, 本研究参照 Mayer (2020)的方法, 将各个研究的效应量 Cohen's d 值进行汇总后求出效应量中位数(median effect size), 并基于该值分析动作化学习的有效性, 以代表研究总体的集中趋势。例如, 当计算动作化学习在保持测验的效应量中值时, 需要求出所有动作化学习与对照组比较研究的效应量, 最后计算出中位数。本研究使用效应量中值作为统计参数出于三点考虑: 第一, 在以往多媒体学习的研究综述和著作中大量使用效应量中值归纳和总结以往的文献, 能够较好的解释和反映研究现状(e.g., Fiorella & Mayer, 2015; Fiorella & Mayer, 2016; Mayer, 2020; Mayer, 2014)。第二, 本文中某些因变量的研究数量少, 尤其涉及主观体验的研究数大多不足 10 项, 为了防止极端值的影响, 使用中位数作为统计分析的参数相对更加合理。第三, 从以往研究来看, 效应量中值与元分析计算出的效应量差异不大。例如 Mayer(2014)计算线索对学习影响的效应量中值为 $d = 0.41$, 而 Aplizar(2020)元分析计算的效应值为 $d = 0.38$ 。又如陈佳雪等人(2018)发现积极情绪促进学习的效应量中值 $d_{\text{保持测验}} = 0.27$, $d_{\text{迁移测验}} = 0.29$, 周丽等人(2019)的元分析发现积极情绪促进学习的效应量 $d_{\text{保持测验}} = 0.25$, $d_{\text{迁移测验}} = 0.30$ 。

“5 总结与展望部分”补充:

第六, 需要谨慎解释基于效应量中值的结果。以往研究中的效应量中值是在一个系

列，被试和实验情境都高度相似的情况下所计算得出的（e.g., : Fiorella & Mayer, 2015; Fiorella & Mayer, 2016; Mayer, 2020; Mayer, 2014），当选取的效应量来自不同的被试群体（特别是不同年龄的）、基于明显不同的学习情境、采用不同的研究范式得出时，利用中位数效应量反映学习策略的效果则可能存在偏差，未来需要进一步使用更为精确的计算方法（例如：元分析）进一步验证动作化学习的有效性。

本条意见涉及的参考文献：

陈佳雪，谢和平，王福兴，周丽，李文静. (2018). 诱发的积极情绪会促进多媒体学习吗？*心理科学进展*,

26(10), 1818-1830.

周丽，王福兴，谢和平，陈佳雪，辛亮，赵庆柏. (2019). 积极的情绪能否促进多媒体学习？基于元分析的视角. *心理发展与教育*, 35(6), 697-709.

Alpizar, D., Adesope, O. O., & Wong, R. M. (2020). A meta-analysis of signaling principle in multimedia learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 68(5), 2095-2119.

Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity: Eight learning strategies that promote understanding*. Cambridge University Press.

Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2016). Eight ways to promote generative learning. *Educational Psychology Review*, 28, 717-741.

Mayer, R. E. (2020). *Multimedia learning* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Mayer, R. E. (2014). *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press.

意见 3：就目前已有的研究来看，“learning by enacting”对学习的促进作用是明显存在的，但同时存在明显的边际条件。从理论角度分析，在两种条件下“learning by enacting”的效果可能较好：一是在低龄儿童身上，二是在学习复杂的相对抽象的概念时。建议作者在这方面再结生成学习理论和认知负荷理论等相关理论，略微加以更细致的分析讨论。

回应：非常感谢审稿专家的建议！我们基于专家的建议在如下方面做出改进：首先，在 2.1 中补充了对年龄和知识复杂度方面的分析。具体而言，我们发现确实低龄的学习者在学习成绩可能存在更高的学习效果，小学生进行动作化学习促进保持成绩的效应量中值为 $d = 0.80$ ，而大学生进行动作化学习促进保持成绩的效应量中值为 $d = 0.20$ 。需要补充说明的是，在知识复杂度层面，以往研究探讨低龄学习者往往都是使用的简单材料（如：故事书），而成人使用相对抽象的材料（例如：化学分子），因此我们没有进一步分析效应量中值，因此这与基于年龄的分析结果高度重合。另外我们还对实物动作化学习比较虚拟动作化学习的研究进

行了分析，探讨年龄和知识复杂度的影响，但由于这些研究基本都是考察相对抽象的知识，同时保持测验研究少无法计算效应量中值，迁移测验效应量几乎没有差别，因此没有在 2.2 部分添加这些内容，但我们会在后续的理论 and 讨论部分中适当提及。其次，在理论部分增加对年龄和知识复杂度的分析，按照专家的建议，我们基于各个理论对上述问题进行了补充表述。最后，在讨论部分的第二段有关动作化学习影响因素的展望中修改和添加了部分内容。在“2.1”中补充内容：

.....第一，学习者年龄可能影响动作化学习的效果。基于表 1 内容，补充分析小学生和大学生在动作化学习下的表现，结果显示小学生进行动作化学习促进保持测验和迁移测验的效应量中值分别为 $d = 0.80$ 和 $d = 0.61$ 。而在大学生进行动作化学习促进保持和迁移测验的效应量中值分别为 $d = 0.20$ 和 $d = 0.63$ 。上述结果可能表明对于低龄学习者来说进行动作化学习具有更好的帮助。但目前缺少直接的实证研究证据对此进行探讨。第二，学习材料较为单一。动作化学习促进保持测验和迁移测验结果的研究中，小学生的研究主要基于故事书材料，而大学生的研究主要是基于化学分子表达式的学习材料，两种材料的差异可能也会导致动作化学习结果的差异，未来需要使用更多的学习材料去验证。

在“4 动作化学习的理论基础”第一段补充：

.....此外，低龄的学习者可能从动作化学习中更能获益，因为低龄学习者认知能力还处于在发展阶段，感觉运动体验则对认知发展具有关键的作用 (Piaget, 1952; Laakso, 2011)，因此有具身性的动作化学习可能更有利于促进低龄学习者的学习。同样，当学习材料更加复杂抽象时，学习者利用教学模型可以更加直观地理解知识，而简单的知识可能仅通过图片也能促进知识表征。但上述仍需要研究进一步验证。

在“4 动作化学习的理论基础”第二段补充：

.....此外，对于低龄学习者而言，教学模型本身作为一种学习支架，可能更有利于低龄学习者与学习内容之间建立联系，使学习者选择到关键的知识内容，进而提升了知识的组织和整合。对于复杂材料而言，教学模型帮助学习者理解学习内容降低了学习难度，促进了学习者对知识的选择，组织和整合过程，最终提高了学习成绩。

在“4 动作化学习的理论基础”第三段补充：

.....基于 CLT，当学习内容复杂抽象时，学习者可能感知到更高的内在认知负荷，而基于教学模型的动作化学习可以降低学习者的内在认知负荷，最终可能促使学习者付出更多的努力去完成学习任务，进而提高了学习者的相关认知负荷，最终促进了学习成绩。对于不同年龄的学习者而言，低龄学习者的工作记忆能力要比成人学习者更低 (Siegel, 1994)，因此低

龄学习者更可能面临认知负荷的超载，通过动作化的学习可以减少低龄学生的内在认知负荷，进而对学习有利。但未来仍需要通过实证研究进一步探讨不同材料和不同年龄的学习者在动作化学习下认知负荷的变化情况。

此条意见修改的相关参考文献

Laakso, A. (2011). Embodiment and development in cognitive science. *Cognition, Brain, Behavior*, 15, 409-425.

Piaget, J. (1952). *The Origins of Intelligence in Children*. Norton & Co.

Siegel, L. S. (1994). Working memory and reading: A life-span perspective. *International journal of behavioral development*, 17(1), 109-124.

第二轮

审稿人 1 意见：

作者对专家提出的意见进行了较为详细说明和修改。文章在表述的准确性上和可读性上有所提高。但发现尚有下面问题：

意见 1：摘要中修改的文字欠简练，建议修改。

回应：非常感谢专家的建设性意见！我们将摘要中的内容进一步简化，提高可读性，总体缩减约 40 字左右，具体内容见正文中摘要。

意见 2：文中“经过筛选后最终纳入分析的文献共计有 55 项研究，其中比较有无动作化学习的研究 29 项(见表 1)”，表明纳入的这 29 材料时是有无动作学习进行比较的，而作者在自检报告中提及“由于以往研究的实验设计大多只是将实物教学模型和虚拟教学模型进行单独对比，没有设立对照组（即不操作教学模型），是否有所矛盾？

回应：非常感谢您的细致审阅！这个没有矛盾，可能是没有写清楚导致的误解。具体是解释如下：我们原本是想将实物动作化学习，虚拟动作化学习和无动作化学习的研究归类到一个表中，但我们对以往文献的研读和搜集后发现，以往的研究存在大量实物动作化学习和虚拟动作化学习的研究，但没有设立更为基线的对照组，我们将这些研究都放到表 2 当中。而以往有动作化学习对比无动作化学习的研究大多还是以实物动作化学习为主（如表 1 所示），少量的涉及虚拟动作化学习。因此，文中汇总的 29 项研究确实是比较有无动作化学习的研究，从表 1 可知，但这些研究大多数还是实物动作化学习和无动作化学习进行的对比。从表 2 的 27 项研究可知，大多研究只是比较实物动作化学习和虚拟动作化学习两个条件。而同

时考虑实物动作化 vs 虚拟动作化 vs 无动作化的研究从表 2 可知仅有 6 项，我们在 2.2 第一段中对这 6 项研究进行了分析，基本可以发现实物和虚拟两种动作化学习都是有效的。

意见 3：文中主要内容，第 2 点实物动作化学习优于虚拟动作化学习与第 3 点动作化学习能否影响学习者的主观体验，两部分的样本量太少，且还有不一样的结论。因此依据有限的材料得到的结论与展望也难以有说服力，甚至比较牵强。此外，最后的总结与展望，比较琐碎，需进一步提炼。

回应：非常感谢您的细致审阅！正如审稿人所言，文中尤其是动作化学习对主观体验影响的研究数量不多，确实得出的结论需要谨慎。但是作为偏向综述性研究，个别亚类型研究数量少确实是客观存在的。然而，作者认为这些结果对于未来研究和全面介绍这个领域的现状仍然是十分必要的，也具有一定价值。同时，为了更加谨慎地对待这些结果，作者在正文和展望中，也对个别研究数量少的问题进行了特别说明，仍应谨慎解释目前的结果。具体如下：

在“2.2 实物动作化学习优于虚拟动作化学习”这一小节中，作者进行了两个方面的分析，首先探讨实物动作化 vs 虚拟动作化 vs 无动作化学习的研究，同时考虑这三个实验条件的研究仅有 6 项，有 3 项发现实物和虚拟都比无动作化更好，有 2 项发现实物比无动作化更好，上述结果从趋势上表明动作化学习（实物或者虚拟）基本是有效的，而实物和虚拟谁更好似乎存在争议。由于以往研究更多地是关注实物动作化 vs 虚拟动作化两个实验条件的对比，共有 27 项研究，因此基于上述的分析结果进一步对比了这两种动作化学习的研究。因此，2.2 中重点关注的是实物动作化 vs 虚拟动作化 27 项研究中的结论，样本量满足基本需求。而实物动作化 vs 虚拟动作化 vs 无动作化学习的 6 项研究结果的分析是为了更好地递进到实物动作化 vs 虚拟动作化，不作为本文的重点，虽然研究数量少，但趋势上说明实物和虚拟两种动作化学习相比于无动作化学习还是要更好的，需要进一步探讨实物动作化 vs 虚拟动作化，作者认为此部分还是具有一定的价值，考虑保留。

在“3 动作化学习能否影响学习者的主观体验”这一小节中，涉及的研究较少，每一种主观体验均未超过 6 项。但这些研究结果的趋势基本比较一致，动作化学习相比无动作化学习可能提高学习者的主观体验（如学习兴趣），实物动作化学习相比虚拟动作化学习可能也有更高的主观体验（如学习兴趣，学习信心）。同时，通过对主观体验的分析有利于呼吁未来研究者更多地关注动作化学习中的主观体验，这部分的分析具有一定的价值和意义。此外，为了说明该部分研究数量有限，应谨慎地对待目前的结果，我们在该部分最后一段增加了内容：

通过上述的分析可知，主观体验可能是解释学习结果的一个重要调节因素，但结果并不稳定，可能有如下的原因所致：首先，有限的研究数量无法全面地反映结果的全貌，未来需要更多地研究探查学习者在动作化学习中的主观体验。

同时在讨论第六点最后一段增加内容：

...此外，动作化学习对主观体验影响的研究数量目前仍较少，对于结果应谨慎解释，未来需要更多研究探讨动作化学习对主观体验的影响。

除上述外，依据审稿人的建议，我们将总结与展望内容进一步凝练，让逻辑更加顺畅。经过调整，讨论部分依次从理论，影响因素（动作化学习任务本身的因素，动作化学习任务之外的因素，学习者个体因素），局限三个方面进行阐述，具体而言：第一，从理论层面上阐述动作化学习仍需一个系统性理论。第二，探讨影响动作化学习任务本身的因素，包含触觉在任务中的重要性和任务难度两个部分（将之前其他部分中的任务难度并到此段）。第三，探讨其他教学策略或教学支架对动作化学习的影响（将之前合作学习策略的内容并到此段）。第四，动作化学习中学习者的特征对动作化学习的影响（增加关于个体知识经验的内容）。第五，本研究中方法的局限。具体内容见正文部分修改。

意见 4：概念命名不够准确。例如虚拟动作化按文中的定义，只是观察动作。而不是虚拟化动作。此外，既然虚拟动作只是观察动作，无实际动作操作，那么与无动作又有什么区别呢，文中也未有交待。使几个关键概念不清晰。

回应：非常感谢审稿人的细致审阅！虚拟动作化学习的原本含义并非是观察动作，虽然虚拟动作化学习主要靠视觉，但学习者也需要通过鼠标和键盘进行操作，例如拖拽旋转教学模型进行学习(e.g., Casselman et al., 2021; 见图 A)，而以往也有研究需要像操纵实物一样去操纵虚拟模型（即动作与任务的高一致性; 见图 B）的研究，并发现比无动作化学习更好（Stull & Hegarty, 2016）。因此，虚拟模型学习也是一种动作化学习，当学习者通过鼠标或键盘旋转教学模型时也起到了与实物动作化学习相同的效果，也有“enact”（演示）的意味。而以往虚拟模型中的研究中也涉及与实物动作化学习类似的手操作，因此操作虚拟模型的学习也属于动作化学习的一种。这源于我们对前面虚拟动作化学习的定义不够清晰，我们在此次修改中重新进行了解释和修改，，同时补充相关内容更加清晰地描述虚拟动作化学习，在 1 最后一段中修改和补充：

.....虚拟动作化学习一般是在电脑程序中进行，学习者可以通过键盘，鼠标或者其他输入设备操作电脑屏幕中的教学模型（如：化学分子模型）进行学习（e.g., Stull et al., 2013; Stull & Hegarty, 2016）。

.....然而，以往也有研究提供了身体动作与任务高一致性(high-congruence) 的虚拟动作化学习，并发现比无动作化学习更好（Stull & Hegarty, 2016）。

此外，我们的研究中不涉及无动作的教学模型，虚拟模型需要学习者利用鼠标和键盘对模型进行操作，学习者也存在“enact”的过程。而无动作的教学模型的有效性确实是在未来研究中非常值得探讨的一个问题，该条件作为控制组探讨动作化学习中触觉重要性具有一定的意义，例如对比动作化学习和有模型的无动作化学习，可以探讨触觉的有效性，我们也在讨论第三点中添加了如下的内容：

.....例如，对比动作化学习与有模型的无动作化学习是否可以影响学习者的学习效果。

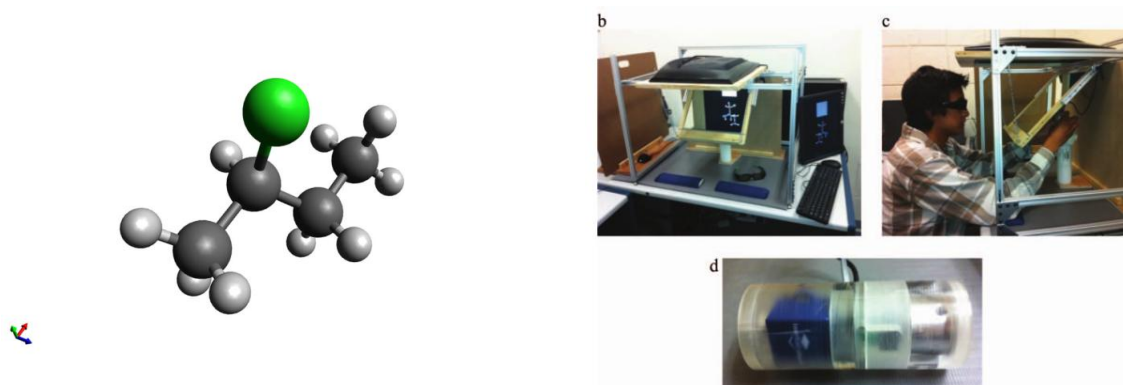


图 A Casselman 等人（2021）的虚拟模型

图 B Stull & Hegarty (2016)的虚拟模型

意见 5：一些概念表述前后不一致或者不具体容易使人产生歧义，如文中多处提到的教学模型似乎应该是动作化的教学模型。

回应：非常感谢您的细致审阅！可能是本文概念过多导致的理解有误。本文中涉及教学模型的研究都是需要学习者对教学模型进行动作化学习，即都需要学习者对实物或虚拟的教学模型进行操作，不存在无动作化的教学模型。为了不让读者造成误解，作者对此进行更改，具体而言：

将“动作化学习中有哪些分类”中第二段第一句更改为：

.....本文主要关注操作教学模型这一类动作化学习，已有的研究主要是基于教学模型的分类，分为实物动作化学习和虚拟动作化学习（见图 1）

并将本文中出现的名词“教学模型”，“实物模型”和“虚拟模型”替换为“操作教学模型”“实物动

作化学习”和“虚拟动作化学习”。

意见 6：自检报告中“生成演示学习”应做出与题目（即动作化学习）一致的修改。

回应：非常感谢您的意见！我们将自检报告中的生成演示学习进行了替换，同时再对正文中进行了检查，确保“生成演示学习”全部都替换为“动作化学习”。

意见 7：正文第一段“然而，学习者被动地观察教师可能并不被视为最佳的学习方式”表述有些拗口。

回应：非常感谢专家的细致审阅！我们将该句改为“然而，学习者被动地观察教师不是最佳的学习方式”。同时，我们对全文中表述也进行了认真检查，确保表述通顺。

意见 8：“1 动作化学习中有哪些分类？”最后一段中“实物模型相比于虚拟模型可能更有利于学习。”这儿应该进一步说明实物教学模型才是动作化学习，这样对下面题目也有交代。

回应：非常感谢专家的建设性意见！如问题 4 中所回应的内容，基于以往的研究，我们将动作化学习分为实物动作化学习和虚拟动作化学习，虽然虚拟动作化学习主要靠视觉，但学习者也需要通过鼠标和键盘进行操作，例如拖拽旋转教学模型进行学习(e.g., Casselman et al., 2021;见图 A)，而以往也有研究需要像操纵实物一样去操纵虚拟模型（即动作与任务的高一致性;见图 B）的研究，并发现比无动作化学习更好（Stull & Hegarty, 2016）。因此，实物模型和虚拟模型都属于动作化学习。在后续的正文中，我们首先探讨了动作化学习（将实物动作化学习和虚拟动作化学习合并为一个整体）和无动作化学习比较的研究，其次探讨实物动作化学习和虚拟动作化学习对比的研究，更进一步的解答两种动作化学习谁更好的问题。此外，为了更好地衔接下面的题目和内容，作者在后面增加了一些内容，具体内容如下：

.....那么，目前的实证研究中基于实物模型的实物动作化学习和基于虚拟模型的虚拟动作化学习是否都要比没有模型的无动作化学习效果更好？实物动作化学习和虚拟动作化学习谁更能够促进学习成绩？本文专门汇总了动作化学习与无动作化学习对比的研究(见表 1)，试图探讨动作化学习的有效性。同时，汇总了实物动作化学习和虚拟动作化学习对比的研究(见表 2)，即将实物动作化学习作为实验组，虚拟动作化学习作为控制组，比较两种动作化学习对学习效果的影响。

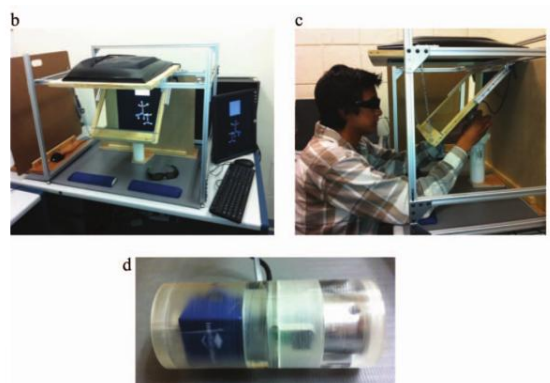
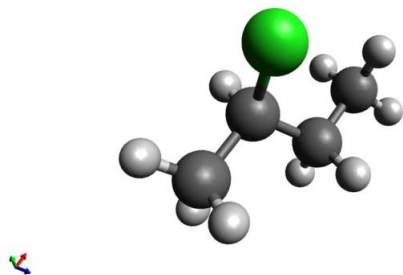


图 A Casselman 等人（2021）的虚拟模型

图 B Stull & Hegarty (2016)的虚拟模型

意见 9：“2.1 动作化学习好于无动作化学习吗？”第二段第一句中“以代表研究总体的集中趋势。”表达欠妥，应该是代表效应量的总体集中趋势吧？

回应：非常感谢您的细致审阅！我们已按照建议将其修改为“以代表效应量的总体集中趋势”。

意见 10：“2.1 动作化学习好于无动作化学习吗？”第三段中的“比较动作化学习和虚拟动作化学习的研究有 27 项”中动作化学习前应增加实物二字，2.2 中一并修改。

回应：非常感谢您的建议！由于我们的疏忽，这里的动作化学习确实代表实物动作化学习，我们对此进行了修正。

意见 11：“2.1 动作化学习好于无动作化学习吗？”最后一段第三行将“补充”改为进一步。

回应：非常感谢您的建议！我们对此进行了修改。

意见 12：“3 动作化学习能否影响学习者的主观体验？”第二段中“在实物动作化学习比较虚拟动作化学习的研究中”不够通顺。

回应：非常感谢您的意见！我们将其修改为“在比较实物和虚拟两种动作化学习的研究中”。

意见 13：“4 动作化学习的理论基础”第二段中“学习者利用教学模型可以更加直观地理解知识”指代要具体。以及最后一段中“而基于教学模型的动作化学习可以降低学习者的内在认知负荷”应该是动作化的教学模型吧，要具体明确。

回应：非常感谢您的建议！我们分别将其修改为“学习者操作利用动作化的教学模型可以更

加直观地理解知识”，“而动作化的教学模型可以降低学习者的内在认知负荷”。

第三轮

审稿人 3 意见：

作者对专家提出的意见进行了较为详细说明和修改。文章在表述的准确性上和可读性上有所提高。但发现尚有下面问题：

意见 1：“1 动作化学习中有哪些分类？”最后一段中“实物动作化学习相比虚拟动作化学习的优势可以通过触摸直接感知到模型的形状、大小以及纹理……那么，目前的实证研究中基于实物模型的实物动作化学习和基于虚拟模型的虚拟动作化学习是否都要比没有模型的无动作化学习效果更好？”。这四句话逻辑欠妥。具体来说，第一句“实物动作化学习相比虚拟动作化学习的优势在于可以通过触摸直接感知到模型的形状、大小以及纹理，再结合模型的视觉信息可以更好地理解学习内容，而虚拟动作化学习提供的信息主要来自于视觉(Ruddle & Jones, 2001)。”已经陈述实物动作化学习是有优势的，意味着实物动作化学习优于虚拟动作化学习。因此第二句“似乎实物动作化学习相比于虚拟动作化更好”中“似乎”就用词不当。第三句“然而，以往也有研究提供了身体动作与任务高一致性(high-congruence)的虚拟动作化学习，并发现比无动作化学习更好 (Stull & Hegarty, 2016)。”中的“然而”一词也欠妥。虚拟动作化学习优于无动作化学习与前两句的结论实物动作化学习优于虚拟动作化学习并不冲突，并未有转折之意。第四句“那么，目前的实证研究中基于实物模型的实物动作化学习和基于虚拟模型的虚拟动作化学习是否都要比没有模型的无动作化学习效果更好？”总结的并不恰当。按照前三句的逻辑，应是实物动作化学习优于虚拟动作化学习，虚拟动作化学习优于无动作化学习，即“实物>虚拟>无动作”。因此作者其实已经对此进行了推论，这时再提出实物动作化学习和虚拟动作化学习是否比无动作化学习效果好的疑问就有些不恰当了。

回应：非常感谢专家的细致审阅和建设性意见！按照专家的建议，我们将第二句中的似乎删除，改为“因此，实物模型相比于虚拟模型更有利于学习”；并将第三句中的“然而”替换为“同时”；专家所提到的第四句确实没有对应“实物>虚拟>无动作”的问题提出，需要结合本段的第五句“实物动作化学习和虚拟动作化学习谁更能够促进学习成绩？”。具体而言，该段第四句对应“实物>无动作；虚拟>无动作”的问题提出（并对应 2.1 动作化学习好于无动作化学习吗？），第五句对应“实物>虚拟”的问题提出（并对应 2.2 实物动作化

学习优于虚拟动作化学习吗？），将两句内容合并看待后则对应“实物>虚拟>无动作”的问题提出。具体修改见正文中的橙色字体内容。

意见 2：“2.2 实物动作化学习优于虚拟动作化学习吗？”第一段中，有 6 项研究设置了控制组，但应该所有研究都会有实物动作化学习和虚拟动作化学习的对比。这一段的标题为“实物动作化学习优于虚拟动作化学习吗”，为何需要强调实物与虚拟两种动作化学习各自与控制组的差异？此外，动作化学习的类型本就是相关研究中的自变量，何来“两种动作化学习的类型可能调节了动作化学习对学习结果的促进效应”中的“调节”一说？

回应：非常感谢专家的意见！本文行文逻辑在一定程度上遵循了元分析的逻辑，确实存在不容易理解的地方。此次修改中对于逻辑表述关系进行了梳理和修改，以确保逻辑顺畅。相关解释如下：首先想要探讨的一个问题是动作化学习是否是有效的，即 2.1 中的内容，在这里没有考虑动作化学习是否属于实物动作化学习还是虚拟动作化学习，而将其作为一个整体，都把它们看作动作化学习，并发现动作化学习优于无动作化学习（类似于元分析中的总效应分析）。

接下来就需要探讨，究竟是哪一种动作化学习好于无动作化学习（类似于元分析中的调节效应，将动作化学习的类型作为调节变量），即动作化学习的类型是否调节了动作化学习对学习结果的促进效应，但严格来说，元分析中的总效应分析和调节效应分析必须要同时在实验设计中存在实物，虚拟，无动作化三个组才可以探讨这一问题，但以往研究中只有 6 项，因此我们对这 6 项进行了分析，大致发现实物和虚拟都是促进学习的，与 2.1 中结果一致，并实物和虚拟对动作化学习的影响可能存在差异，即两种动作化学习的类型可能调节了动作化学习对学习结果的促进效应，但研究数量有限，以往探讨动作化学习类型的实证研究大量还是探讨了实物 vs 虚拟，因此接下来再重点探讨实物 vs 虚拟的研究。

作者认为这 6 项研究的结果具有一定价值，为更全面地分析目前实证研究的现状，验证 2.1 中的结论和引出 2.2 具有一定的作用。此外，对于两种动作化学习的类型可能调节了动作化学习对学习结果的促进效应”中的“调节”确实存在一定歧义，作者在文中将其删除。

意见 3：“3 动作化学习能否影响学习者的主观体验？”标题与首句就相互矛盾。标题讲动作化学习是否影响学习者主观体验，而第一句则说学习者的主观体验能够解释动作化学习如何影响学习结果。这两句论述表达是完全不同的含义，请作者斟酌。此外，该标题下最后一段中，“主观体验可能是解释学习结果的一个重要调节因素”这一句也欠妥，请作者明晰主观体

验到底是“因变量”，还是“调节变量”。

回应：非常感谢专家的细致审阅！确实在表述的逻辑上存在问题，我们调整和修改了专家所提到的内容。该标题下第一段是分析动作化学习对主观体验的影响，我们将该主题句改为“学习者在进行动作化学习时可能会产生相关的主观体验。”确保与后续内容一致。第二段是分析动作化学习对主观体验和学习结果的影响是否一致，类似相关或者“中介”，原文有关“调节”的表述有误。因此最后一句更改为“通过上述的分析可知，动作化学习可能影响学习者的主观体验，并进一步影响学习成绩，但结果并不稳定，可能有如下的原因所致”，该句意在对上述两段的内容进行总结。

意见 4：“4 动作化学习的理论基础”中，具身认知理论和认知负荷理论的在解释动作化学习的论述中有相似之处。如在具身认知理论的解释中，作者提到“只有当身体活动与当前学习目标高相关时才有利于学习，身体活动程度越高可能会造成较高的认知负荷，阻碍学习结果。”那么，是否不管身体活动与当前学习目标是否高相关，只要身体活动程度越高，就会有较高的认知负荷，从而阻碍学习？请作者对所提到的理论做更细致的分析。

回应：非常感谢审稿专家的建议！基于认知负荷理论（CLT），作者认为专家提出的“不管身体活动与当前学习目标是否高相关，只要身体活动程度越高，就会有较高的认知负荷，从而阻碍学习”是可以通过理论推断的，作者基于认知负荷的不同类型进行了更为细致的分析，将下面的内容补充到介绍 CLT 的段落中：CLT 的核心是将认知负荷分为了三类：内在认知负荷(intrinsic cognitive load)，外在认知负荷(extraneous cognitive load)和相关认知负荷(germane cognitive load) (Leppink et al., 2013; Sweller et al., 2011)。内在认知负荷和相关认知负荷正向预测学习成绩，而外在认知负荷负向预测学习成绩（Krieglstein et al., 2022）。结合具身认知理论所提及的内容，身体运动与认知负荷之间也可能存在联系，若身体运动与学习任务之间相关程度高，则学习者感知到的内在认知负荷和相关认知负荷可能更高，即学习者将更多的认知资源分配到学习任务中，这将促进学习者的学习成绩。当身体运动程度的高低与学习内容无关，学习者则会感知到更高的外在认知负荷，即学习者的认知资源被消耗到与学习无关的活动中，这将降低学习者的学习成绩。因此，不考虑身体活动与当前学习目标是否高相关，只要身体活动程度越高，学习者可能感知到高的外在认知负荷，从而阻碍学习。这一推断仍需实证研究进一步验证。

意见 5：请作者对文章进行细致的阅读和校对。如在参考文献的引用中，作者有时会用“e.g.”，

有时会用“例如：”，请统一。再如，表 1 和表 2 中，引导注视组前出现了重复词“引导”。

回应：非常感谢专家的细致审阅！作者将正文括号中的参考文献引用都统一为“e.g.”；同时将表 1 和表 2 中的错误进行了更改。作者也仔细检查了文章的其他部分，确保没有类似的错误。

第四轮

审稿人 3 意见：

作者已经按照上次提出的意见进行了修改。

编委 1 意见：作者针对审稿专家意见进行了认真修改，同意发表。

意见 1：个别句子表达不准确，如“认知负荷理论为动作化学习的干扰作用提供了证据。”可改为“认知负荷理论为动作化学习的干扰作用提供了解释。”

回应：非常感谢专家的细致审阅！我们将此句进行了修改，并再次通读全文确保句子表达准确。

意见 2：文中多处标点符号逗号句号断句较随意，请通读修改。

回应：非常感谢专家的意见！我们通读全文，对断句以及标点符号进行了修改。

编委 2 意见：仔细看了来往的审稿意见，也阅读了全文，同意发表。

主编意见：同意发表。