

# 有效失败与知识迁移:理论、机制与原则

曹 鹭

(华东师范大学 教育学部,上海 200062)

**[摘要]** 促进知识迁移不但是 K-12 阶段 STEM 教育最重要的教学重难点,也是学习科学的重点研究内容。作为一种创新的教学方法,有效失败(Productive Failure)可以帮助 STEM 课堂达成知识的近迁移与远迁移,在近 10 年得到了越来越多的关注。与传统的直接教学(Direct Instruction)方法不同,有效失败主张让学生先解决复杂的新问题,教师再介入指导。本文从底层理论、核心机制、设计原则三个方面对有效失败进行了梳理与总结,并讨论了有效失败如何帮助学生学习知识、促进知识迁移。文章最后讨论了有效失败的启示与使用限制。

**[关键词]** 有效失败;知识迁移;STEM 教育

**[中图分类号]** G622

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1007-2179(2021)03-0004-11

## 一、引言

随着社会与经济的不断发展,当今的教育正面临着诸多挑战。我国“十四五”规划强调,义务教育不仅需要提高基础的文明素养,更需要提高学生的实践本领。这意味着课堂不仅需要帮助学生掌握知识(例如,陈述性知识、高阶知识等),还需要帮助学生学会将知识运用于新的情境,解决复杂的新问题。这种能力也被称作迁移(Bransford et al., 1999)。促进知识迁移是 K-12 教育的重点教学目标之一。如果学生无法将课堂习得的知识应用于课外,真正学以致用,学校教育就不能很好地匹配社会的实际需求,造成二者之间的脱节。

基于知识迁移的重要性,长期以来,迁移一直是学习科学的研究重点。然而,实现知识迁移并不容易。一方面,很多研究证明了知识迁移的困难(Anderson et al., 1996; Bransford & Schwartz, 1999)。另一方面,2018 年的 PISA 测试结果表明,即使在我国教育发达地区,科学学科(即物理、化学、生物三科总

称)的测试中,也仅 32% 的学生达成近迁移(同领域内的迁移,如用学到的生态学知识解决某地区物种濒危问题),而能达成远迁移(跨领域的迁移,如运用生态学动态平衡概念解释商科中的商品供需平衡关系)的仅 7%,且中国已是全球科学学科测试表现最好的国家(OECD, 2019)。因此,帮助学生提高知识迁移能力,尤其是远迁移,仍有较大的提高空间。

经过一个世纪的研究,对如何认识知识迁移,如何促进知识迁移等问题,学界在经典迁移理论的基础上,又提出了新的观点。本文将介绍一种基于现代迁移理论且近年备受瞩目的创新教学方法——有效失败,讨论其如何有效促进知识迁移。有效失败由摩奴·卡普尔(Kapur, 2008)提出,主张让学生在没有任何结构性指导的情况下参与解决复杂的、非良构问题,因为此时遇到的挫折是一种有价值的实践。一般来说,传统课堂教学主张“先学后做”,即先由老师传授知识,结构性地指导学生应如何理解和处理问题,然后布置习题让学生练习或尝试解决问题。这是一种直接教学的方法。有效失败则是一种相反

[收稿日期] 2021-05-03

[修回日期] 2021-05-10

[DOI 编码] 10.13966/j.cnki.kfjyyj.2021.03.001

[基金项目] 华东师范大学教育学高峰学科建设项目。

[作者简介] 曹鹭,博士,华东师范大学教育学部博士后,研究方向:学习科学、教育技术、STEM 教育(lcao@dedu.enuc.edu.cn)。

[引用信息] 曹鹭(2021).有效失败与知识迁移:理论、机制与原则[J].开放教育研究,27(3):04-14.

的教学方法,鼓励“先做后学”,即让学生先试着自行解决复杂的、劣构的新问题,教师几乎不提供任何帮助,之后再由教师介入并展开教学。近年来,越来越多的研究结果显示,有效失败能有效促进知识迁移(Jacobson et al., 2017; Kapur, 2014; Lai et al., 2016; Loibl & Rummel, 2014)。

## 二、底层学习理论

(一)用动态视角看待迁移:未来学习准备的视角

迁移概念自提出至今,已有一百多年。早期的迁移研究(Woodworth & Thorndike, 1901; Detterman & Sternberg, 1993; Haskell, 2000)均发现知识迁移很容易失败,不易实现。例如,伍德沃斯和桑代克(1901)发现,在教学学生计算正方形的面积后,学生几乎无法将面积计算原则运用于计算三角形或圆形面积。因为这些失败的结果,有些学者甚至悲观地认为,知识迁移在学习过程中几乎不存在(Dettermann & Sternberg, 1993)。20世纪90年代初,针对能否实现知识迁移,学界进行了多次辩论(Anderson et al., 1996; Tuomi-Gröhn & Engeström, 2003)。从这些辩论可以发现,尽管一系列案例支持迁移的存在,但整体而言知识迁移依旧是罕见的、困难的。实现知识迁移绝非易事,尤其是远迁移(Perkins & Salomon, 1992)。

经过近九十年的争论,在前期研究与争论的基础上,布兰斯福德等(Bransford & Schwartz, 1999)指出,需要重新概念化对迁移的认识。他发现,过去关于迁移的研究采取了非常类似的范式,即先教学生目标知识,然后让他们直接应用该知识解决问题,并用该问题测试学生是否表现出知识迁移。伍德沃斯和桑代克的面积原理应用实验就是经典的例子。布兰斯福德(Bransford & Schwartz, 1999)将这种“将迁移描绘为能直接把先前的学习应用到新环境或问题”的理论称之为迁移的直接应用理论(direct application theory)。与这种理论相呼应的范式叫作隔绝式解决问题(sequestered problem solving)。布兰斯福德认为,直接应用理论与隔绝式问题范式是掩盖成功知识迁移的重要原因。

那么,直接应用理论与隔绝式解决问题范式的问题在哪呢?布兰斯福德指出,它们最大的问题在于:将迁移看作是一次性、静态的学习结果,而非长

期的、动态的学习过程。隔绝式解决问题范式这种“学完即用”的学习过程隔绝了学生的先前知识、经验与学习感知。布兰斯福德和施瓦兹(Bransford & Schwartz, 1999)分别请五年级小学生和大学生解决一个有关如何保护当地秃鹰(一种当地的濒危生物)的问题。结果表明,无论是小学生还是大学生都无法给出恰当的保护方案,尽管大学生的写作与表达能力更强。按照直接应用理论,无论哪类学习者都无法把所学直接应用于问题解决,那么他们先前接受的科学教育就是一种失败的迁移。但是,研究者发现在解决问题的过程中,小学生考虑问题相对肤浅,更偏向于秃鹰个体;大学生考虑问题相对更深,更关注秃鹰与栖息地之间的关系。显然,大学生受过更多的生物教育,他们对秃鹰保护的认识更为深层与关键。如果给予他们时间自行寻找资料或者额外听讲的机会,大学生肯定能够在后续学习过程中抓住与解决问题相关的关键资料或知识。经过一轮的额外学习,大学生的测试表现大概率会优于小学生。

秃鹰保护案例引出一个观点,即人的先验知识、经验、知觉、判断、解释等都会影响今后的学习。这就是布兰斯福德(Bransford & Schwartz, 1999)提出的现代迁移理论——为未来学习做准备(prepare for future learning)的重要前提。他认为,知识迁移成功的关键是学生在学习目标知识前,是否针对未来的学习做好了充分准备。换句话说,知识迁移并非只有“迁移输出”这一应用知识环节,学生自带的东西(先验知识、经验等)会影响他们(例如,听教师讲解目标概念)对目标知识的看法与解释,而运用先前所学所知解读与学习当下的新知识同样也是迁移,被称为“迁移输入”(Schwartz & Martin, 2004)。迁移过程其实是迁移输入至迁移输出的过程。

未来学习准备是支撑有效失败的重要底层学习理论,其提出有十分重要的意义。它从动态角度重新定义了知识迁移,即迁移是一个从迁移输入到输出的动态过程。假设将学习目标知识前的准备看作是学习过程的一环,那么知识迁移是长期的学习过程,而非一次性学习的成果。这一想法呼应了学界许多类似的观点。例如,比约克等(Bjork & Bjork, 2011)提出的“值得的困难”(desirable difficulties),即通过给学生施加困难(例如,让学生发明解释)加强学生长期的学习效果,而非短期表现。洛巴托

(Lobato, 2012) 面向参与者的迁移 (actor-oriented transfer) 也认为,“从面向参与者的迁移的角度出发,根据最初对活动和事件的解释,学生将迁移看作他们已经考虑过的事情的实例”。这里的“最初学习”,与对未来学习的观点相呼应。季清华等 (Chi & VanLehn, 2012) 也指出学生通过解决问题学习迁移,需要在初始学习阶段 (即解决问题期) 对初始问题进行建构,以达到对该问题的深度理解与解读。对初始问题的肤浅理解导致许多迁移的失败。除了 STEM 学科,在语言学习迁移方面,拉森-弗里曼 (Larsen-Freeman, 2013) 认为语言学习的迁移是动态的过程,而非简单地将知识从一个情境直接搬到另一个情境。总的来说,未来学习准备理论拓展了对知识迁移的认知,对迁移研究有着深远的影响。近年来,越来越多的学者支持与未来学习准备类似的观点。

未来学习准备也为教学设计给出了重要的教学框架,即达成知识迁移需要一个解决问题期 (problem-solving phase), 用于准备未来的学习, 和一个指导期 (instruction phase)。这两阶段共同组成一个完整的学习活动。该框架的特点是将教学顺序颠倒, 从传统的“先学后做”型的隔绝式解决问题范式更改为先开展解决问题活动, 后教师介入直接指导。这种采用未来学习准备框架的教学方法被称作解决问题-指导法。有效失败实际上是解决问题—指导法的特定应用。另一种知名的解决问题—指导法是发明 (invention), 由施瓦兹与马丁 (Schwartz & Martin, 2004) 提出, 在核心机制上与有效失败有些区别。发明的具体机制与设计原则, 可阅览施瓦兹与马丁 (Schwartz & Martin, 2004) 的论文。

## (二) 僵局驱动学习理论 (Impasse-Driven Learning)

尽管都建立在未来学习准备的视角上, 与其它解决问题—指导法不同, 有效失败强调失败在学习中的扮演的角色。即使学生在前期学习中遭遇暂时性失败, 这份失败的体验也能帮助其开展后续学习, 进而有效促进知识迁移 (Kapur, 2012, 2014; VanLehn et al., 2003)。此外, 有效失败的提出还建立在范冷的一系列与僵局有关的研究上 (VanLehn, 1988, 1999; VanLehn et al., 2003)。僵局是失败的一种类型, 即“学生陷入僵局, 检测到错误, 或正确地采取了行动, 但行动具有不确定性” (VanLehn et al., 2003)。

范冷提出的僵局驱动学习理论 (VanLehn,

1988) 认为, 大部分学习事件是由陷入僵局引发的。范冷通过观察学生解决算术问题发现, 部分学生运算三位数减法时出错。该错误并非源于学生的粗心 (即非系统性错误), 而是因为学生缺乏目标知识, 或对目标知识有错误的认识。范冷把这种学生在计算中出现的错误称为故障 (bug), 一系列故障组成了系统性错误。不仅如此, 他还发现学生可能在解同类型题目时会发生多种错误。比如, 同样是百位数减法运算, 学生有时错在只借百位, 不借十位 (例如“ $211-103 = 18$ ”), 有时错在只借个位 (例如, “ $211-103 = 118$ ”)。范冷把这种学生前后出现多种故障的现象定义为故障移动 (bug migration)。

僵局驱动学习理论将学生解决百位数减法运算的学习过程拆分为三步: 第一步, 学生发现过去用于二位数减法的解题思路 (“只借最左且毗邻的位”) 在三位数减法中不再适用, 就此陷入僵局。第二步, 为了摆脱僵局, 学生会重新解读该问题应如何操作。范冷 (VanLehn, 1988) 将这个�过程称为修理 (repair)。通过对问题操作再解读, 学生会放宽已有标准, 得出新的操作, 例如只借最左位 (不借毗邻位), 甚至只借个位, 亦或只借毗邻位 (不借最左位)。第三步, 学生执行新操作。前两种操作最后会得到错误答案, 第二种操作会得到正确答案, 这说明通过修理得出的新操作未必正确, 这是个重要观点。修理往往基于学生已有知识, 每次修理根据激活已有的不同知识会造成不同的故障, 这也解释了为何会出现故障移动。

值得注意的是, 僵局发生后, 在没有干预的情况下, 学生通过自我解释, 可以修复僵局, 并自发习得一种用于理解与解决问题的新规则。如果这个规则是错误的, 则被称为不良规则 (malrule)。不良规则在格式和功能上和正确规则一样, 二者的区别只在于学生运用它们能否获得正确答案 (VanLehn, 1988)。僵局驱动学习理论认为, 学生遇到僵局后, 学习就会发生。如果学生通过自我解释习得不良规则, 则该学习结果是负面的; 反之, 如果在产生僵局的节点上, 学生意识到自我解释得来的规则可能是错误的, 会求助教师或同学以获得正确解答, 并将新知识、新解题步骤整合到已有的知识, 此时该学习结果是正面的。

糟糕的是, 如果学生一旦习得不良规则, 他们每

次解决同类问题都会重复错误的解题过程,导致稳定故障(stable bugs)的发生。只要稳定故障不被修正,即使接受教师指导后,学生还是会保留两套规则,即正确规则与不良规则(VanLehn,1988)。某些情境下(如接受指导的过程中),学生有足够的 ability 区分两者并运用正确规则。然而,一段时间后,遇到不熟悉的情境,学生可能会不确定哪个规则有用,并可能再次运用旧的不良规则。这也解释了为何学生接受教师指导一段时间(如半年)后,还会再犯过去一样的错误。因此,在僵局发生后,教学必须介入以帮助学生彻底抛弃不良规则。

僵局驱动学习理论获得了实证研究的支持。在范冷等(VanLehn et al.,2003)的辅导研究中,大学物理系学生被要求解决一系列非线性动力学问题。学生需要在辅导者的帮助下,分析应该用哪些动力学原理解决问题。研究表明,学习在学生陷入僵局后更普遍地出现。反之,学生没有经历失败,即使辅导者直接向学生解释物理学原理,辅导者的解释与学习的发生也无关联。这表明,僵局与学习相互关联。陷入僵局是现有知识需要被修正的信号(VanLehn,1999)。如果没有陷入僵局,学习很难发生。范冷等(VanLehn et al.,2003)随后提出了一个理想的学习过程,即在解决问题的学习中,以学生陷入僵局为信号,学生自我解释对问题的理解,辅导者介入并给予指导与解释,纠正学生的错误观念,最终建立新的知识。

僵局驱动学习理论的提出有着积极的意义。在直接教学法为主的情况下,僵局驱动学习理论强调失败在学习中的重要地位。该理论还详细阐述了解决问题的学习过程,并强调僵局发生后,必须彻底纠正

学生的错误认知才能真正学到正确的知识。其它研究也指出经历失败对学习有积极的促进作用,尤其在解决问题的学习中。有价值的失败能更好地帮助学生认识问题,深度理解概念(Kapur,2008;刘徽等,2020)。

## 二、核心机制

有效失败理论提出后,一系列的实证研究证明有效失败可以支持初中数学概念性知识的近迁移(Kapur,2008,2010,2011)。在此结论上,卡普尔和贝拉可兹可(Kapur & Bielaczyc,2012)提出了有效失败的核心机制,但未详细阐述。在其基础上,洛伊布尔(Loibl et al.,2017)建立了解决问题-指导法学习机制。结合前两者的讨论,本文归纳和阐述了有效失败的核心机制,讨论这些机制与哪些有效失败的教学设计元素对应。这些机制分别是:1)激活与目标概念有关的先验知识与经验(机制1);2)意识到知识缺口(机制2);3)关注目标概念的深层特征(机制3);4)组织和组装深层特征至目标概念(机制4)。

卡普尔等将有效失败分为两个阶段:1)解决问题期,又称生成期(generation phase);2)指导期,又称巩固与知识组装期(Kapur & Bielaczyc,2012)。在解决问题期,学生需要尽力尝试解决一个从未学过的复杂问题,并在该阶段生成多个表述或解决方案;在指导期,教师将学生的错误解决方案与正确解决方案对比,并传授学生目标概念。图1展示了两个阶段主要对应的核心机制。四个机制的触发有时间点要求:1)机制1必须在解决问题期被触发;2)在触发机制1的基础上,才能触发机制2与机制3;3)进入直接指导期后,机制2与机制3会被二度触发;4)最终触发机制4。实证研究表明,即使采用同

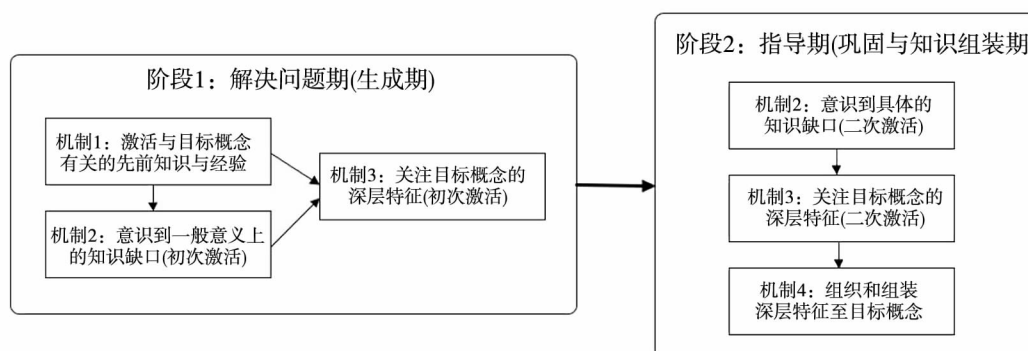


图1 有效失败的两个阶段与核心机制

样的学习任务与指导,有效失败帮助学生高阶知识与知识迁移依旧优于传统的直接教学法(Kapur, 2014; Loibl & Rummel, 2014)。这表明触发机制的顺序非常重要。

为了认识失败、有效失败与核心机制的交互,本文关联失败与有效失败的核心机制,即经历失败如何有效促进有效失败机制。需说明的是,失败分两种:一种着眼于学生表现,即学生是否成功解决了问题,另一种指失败的内容本身,即学生解决问题期是否生成了不正确或次优的表述或解决方案。有效失败更关注后者。

(一)机制1:激活与目标概念有关的先前知识与经验

有效失败学习活动开始于解决问题期。在这个阶段,老师为学生提供复杂的、劣构的问题。机制1的激活指,学生在解决复杂问题的过程中,尽可能地联系先前知识与经验,并运用这些知识与经验理解、解释、阐述新问题。这不仅是有效失败的机制,许多研究者认为学习新知识需要激活学生的先前知识。根据建构主义观点,当学生把过去的知识与经验与当前的教学指导结合以构建自己的意义时,有价值的学习才会发生(Jonassen et al., 2002)。根据认知主义的观点,运用先前知识能帮助学生发现问题的表面特征,为理解问题背后的深层结构与目标概念奠定铺垫(Chi & VanLehn, 2012)。另外,学生运用自我解释理解问题也能激活先前知识(Margulieux & Catrambone, 2019; Schworm & Renkl, 2006)。

在解决问题期,学生可能会激活多种先前知识。例如,卡普尔等(Kapur & Bielaczyc, 2012)研究发现,学生在解决有关平均速度的复杂问题时,生成了多种表述或解决方案,激活了速度、比率、一元二次方程等先前知识,尽管这些解决方法都不正确或不标准。后续研究表明,学生解决问题期生成的表述或解决方案的数量与他们后续近迁移的表现正相关,解决方案的质量不影响迁移结果(Kapur, 2012, 2014, 2018)。不仅如此,卡普尔(Kapur, 2012, 2014)发现与直接教学组的学生相比,有效失败组的学生激活了更多的先前知识。以上研究结果表明,有效失败能更好地帮助学生激活先前知识与经验,并最终促进后续的知识迁移。

从失败的视角看,由于解决问题期教师不提供

任何指导,加之没有学过目标概念,几乎都会经历困难与失败。然而,失败恰好能促进学生更好地激活先前知识与经验。这是因为只有遇到了难以解决的问题,学生才会不断地尝试从多个角度解释、阐述、评估问题。有了这个努力寻找解释、解决问题的过程,学生才能生成比过去(指接受直接教学)更多的表述或解决方案,甚至暴露出各种空白与错误,教师也才能在后续教学中帮助学生填补知识空白,纠正错误认知,区分先前知识与经验与目标概念的差别。可以说,失败为学生提供了激活知识的机会。

(二)机制2:意识到知识缺口

在生成期,当学生的先前知识与经验被尽可能地激活,却依然不能解决问题时,他们就可能意识到知识缺口的存在。范冷(VanLehn, 1999)的研究表明,只有在学生意识到没有能力解决问题时,学习才会发生。换句话说,学生只有意识到自己存在知识缺口时,才会设法弥补自己的不足。反之,如果学生认为自己已经完全理解目标知识,学习效果可能反而被阻碍。这个结论得到了实证研究的支持。例如,罗尔等(Roelle & Berthold, 2016)给学生展示四个不同原子玻尔模型并要求学生比较异同。其中,实验组学生需要比较异同后自我解释他们发现的每一个异同点,而对照组不需要自我解释。最后,所有学生获得目标概念的指导。结果表明,当学生指出所有异同点时,自我解释反而阻碍了学习。该结果的可能解释是因为学生找出所有异同点时认为自己已经理解了目标概念,没有意识到知识缺口,导致不再花精力理解后续的教学指导,从而降低学习效果。施瓦姆等(Schworm & Renkl, 2006)也发现,用基于计算机的辅导系统,比起仅仅给学习者提供及时的指导解释,敦促学习者自我解释能更好地促进学习。因为一旦给予学习者即时的指导解释,学习者可能会过于依赖正确的指导,忽略对自身学习的认识,无法意识到知识缺口,从而降低学习效果。

在解决问题期,经历失败能大幅促进学生意识到知识缺口。这是因为遇到失败后,学生会本能地意识到自己知识存在不足。此时学生往往只能一般意义上认识自己缺乏某些知识,很难把此知识缺口对应到某个知识点。但在指导期,教师会将学生错误的解决方案与标准的解决方案作对比,指出学生的方案错在哪里,使学生意识到具体的知识缺口

(Loibl & Rummel, 2014)。已有研究表明,比起直接教学组,有效失败组的学生能同时意识到更多一般意义上和具体的知识缺口(Loibl & Rummel, 2014)。不过,该研究同样发现,意识到知识缺口并未与学习结果直接关联。该结果说明,意识到知识缺口本身并不意味着能促进学习。但是,学生对知识缺口的认识会从侧面影响学习,比如意识到知识缺口与失败关联,而失败又与学习的发生关联,两者可能存在间接的联系;意识到知识缺口才能更好地引发机制3。总体而言,有效失败的设计能促进学生意识到一般意义上和具体的知识缺口。只有意识到知识缺口,学生才可能关注目标概念的深层特征,进而学习新知识,达成知识迁移。

### (三) 机制3:关注目标概念的深层特征

机制3是有效失败学习的重点环节。可以说,机制1与机制2的触发是为了让学习者注意到目标概念的深层特征。初学者与专家之间的区别是能否注意到问题背后的深层结构,即认识到目标概念的深层特征(Bransford et al., 1999; Chi et al., 1981; Salomon & Perkins, 1989)。触发机制3意味着离成功的迁移只有一步之遥。与意识到知识缺口相同,机制3可以在有效失败的两个阶段同时被触发。在解决问题期,学生主要通过解释、阐述、评价自己的表述或解决方案,注意到目标概念的深层特征。例如,在曹鹭等(Cao et al., 2020)关于有效失败的研究中,学生被要求学习孟德尔遗传学。在解决问题期,学生需要通过模拟豌豆杂交探究孟德尔遗传学的相关规律。有些学生的阐述只涉及豌豆的颜色、数量、遗传因子等表面特征。有些学生则联系了三者之间的关系。这意味着学生意识到到目标概念的深度特征(例如,关注到豌豆颜色与遗传因子的关系涉及表现型与基因型两个目标概念)。解决问题期触发机制3还有个优势,即一旦学生注意到与目标概念有关的内容,会在后续学习中把精力放在重要而非肤浅的信息上,降低认知负荷。在解决问题期,学生最多只关注部分与目标概念有关的深度特征,这种关注是不完整的。

在指导期,教师会通过对比学生的解决方案和标准的解决方案,明确目标概念的深层特征。类比比较是使概念的深层特征变得明显的一种教学方法,能有效促进迁移(Gentner et al., 2003; Gick & Holyoak, 1980; Jacobson et al., 2020)。因此,类比比较被整合

进有效失败的设计。洛伊布尔等(Loibl & Rummel, 2014)的实证研究表明,在高中生学习方差概念时,有方案讨论(即将学生方案与标准方案进行对比)的有效失败组的学习效果优于有讨论的直接教学组,而有讨论的直接教学组又优于无讨论的直接教学组和无讨论的有效失败组。最后,无方案讨论的直接教学组与无方案讨论的有效失败组的学习效果没有差别。这说明,无论在何种情形下,对比学生方案与标准方案都能增强学习效果。这意味着,即使学生在解决问题期没有注意到目标概念的深度特征,也能够通过听教师对比学生方案与标准方案,关注目标概念的深度特征。同时,有无方案的对比讨论直接影响有效失败的效果。因此,在指导期,将讨论建立在学生生成的解决方案上对实现机制3是必不可少的。

尽管有效失败和直接教学都能通过对比学生方案与标准方案(直接教学组使用的是根据有效失败组得到的常见及代表性错误的学生解决方案)明确目标概念的深层特征,促进知识迁移,但有效失败会让学生经历更多的僵局与挫折。与直接教学相比,学生最初解决问题期通过经历失败激发了更多的先前知识,更好地意识到知识缺口,并能初步意识到一部分目标概念的深层特征。到了指导期,学生那些不完整的、错误的想法会被一口气修复。反之,如果学生接受直接教学,不经历失败,一系列的学习机制就无法被触发,这也解释了为什么在洛伊布尔和拉梅尔的研究中,在同时触发机制3的情况下,采用有效失败获得比直接教学更好的学习效果。

### (四) 机制4:组织和组装深层特征至目标概念

触发机制1-3后,学生最后在指导期得到关于目标概念的直接指导。教师在这个阶段对目标概念进行详细阐述与解释。在这个过程中,学生形成联系紧密、组织完整的知识。为了帮助学生更好地组装习得的知识,有效失败学习活动一般会在最后给学生一个与初始问题类似的问题让学生实践练习,进一步组装目标概念。这一过程也被称为知识组装(knowledge assembly)(Kapur, 2015)。触发机制4是有效失败收尾的学习活动。理想来说,此时学生已对目标知识有了深度认识,能够意识到知识中的重要信息,能够在需要时弹性地检索该知识(Bransford et al., 1999)。换句话说,他们已经具备了知识迁移能力。

### 三、设计原则

达成知识迁移需要精心的教学设计(Anderson & Beavis, 2018; Salomon & Perkins, 1989),有效失败的设计原则比较复杂。最初,卡普尔和贝拉可兹可提出了三个维度及5+3条设计原则(见图2)。国内学者作了介绍(刘徽等, 2020)。在原始设计原则的基础上,辛哈和卡普尔(Sinha & Kapur, 2019)提出了有效失败设计有效性的五条原则:1)提供多个表述或解决方案的问题;2)生成多个表述或解决方案的证据;3)有吸引力的问题描述;4)将小组合作作为参与结构;5)将指导建立在学生方案上。

#### (一)提供多个表述或解决方案的问题

为了能有效触发机制1,设计有效失败活动时,老师应为学生提供复杂的、劣构的问题。良构且不复杂的问题既不涉及多个解决问题,也不接受多样性的回答,故不适用于有效失败的设计。复杂但不良构的问题,学生虽然可能生成多个表述或解决方案(Kapur & Bielaczyc, 2012),但这类问题只有一个答案,对生成表述或解决方案有局限。复杂且劣构的问题没有固定答案,学生可以从多个角度解读评估问题(Aamodt & Plaza, 1994; Frederiksen, 1984; Jonassen, 1997; VanMerriënboer, 2013),表述或生成解决方案更有包容性。

有效失败的初始问题既不能太简单,也不能太难。如果问题难到让学生放弃,那有效失败的设计就会失败。笔者建议不要涉及大量的目标概念,那可能会过度分散学生的注意力,产生过量的认知负荷。其次,如果学习活动的设计者不是目标学生的教师本人,则设计者可以积极与目标学生的教师沟通,请他们评估学生是否具备与目标概念相关的先前知识与经验。是否具备一定的先前知识与经验非常重要,尤其是目标概念离学生日常生活较远时,比如,学习孟德尔遗传学知识前,掌握DNA与减数分裂相关的先前知识对有效失败的开展很重要。

在先前知识符合要求后,设计者应和教师共同确定问题的难度是否合适。如果不能确定问题难度,设计者可以考虑加入鼓励学生接受挑战的学习环境,例如加入基于游戏的学习环境。基于游戏的学习环境会激发学生自然而然地接受失败,并在遇到难题时表现出更强的韧性(Emihovich et al., 2019; Hoffman & Nadelson, 2010; Hung et al., 2015; Whitton, 2018)。将有效失败与游戏结合,能够帮助学生在解决难题时不轻易放弃,保证有效失败的效果。

#### (二)生成多个表述或解决方案的证据

该原则要求学生在解决问题期生成多个表述或解决方案并出示相应的证据。为保证这一点,教师要主动提示与鼓励学生生成多个表述或解决方案。

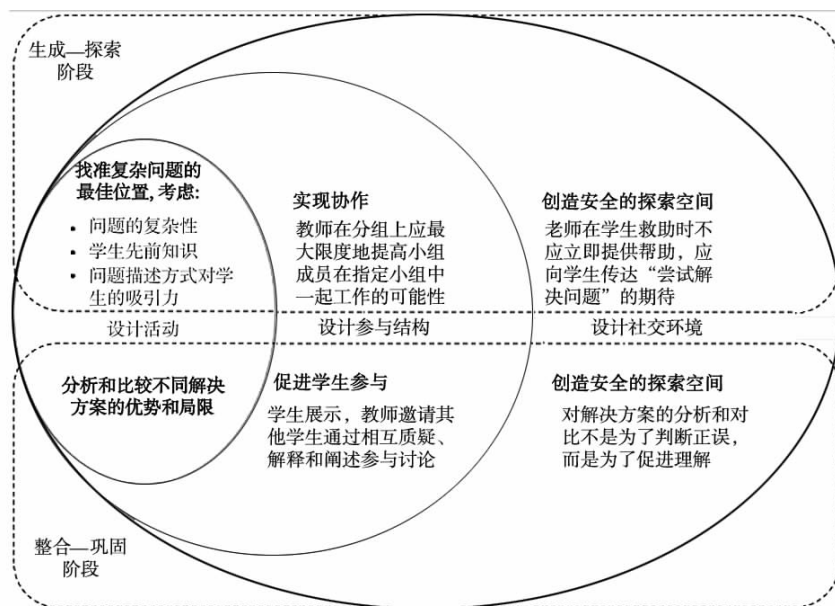


图2 有效失败三个层面涉及的五条教学原则(刘徽等, 2020)



因为如果不提示学生,很少有学生会主动解释问题,开展深度思考(Margulieux & Catrambone, 2019)。预实验的方式可用于验证学生能否生成多个表述或解决方案。如果大部分学生不能生成多个表述或解决方案,则说明该有效失败问题设计不合理,需要重新设计。一般来说,只要与学生事先沟通,生成多个表述或解决方案不会太难。

### (三)有吸引力的问题描述

该原则要求初始问题的描述能吸引学生。卡普尔等(Kapur & Bielaczyc, 2012)提出使用故事性对话、四格漫画等方法保障问题的吸引力。此外,其它方式也能提高问题的吸引力,如提供基于游戏的学习环境(Cao et al., 2020),或在问题设计中加入幻想元素(Malone & Lepper, 1987)等,只要问题的设计或学习环境能激发学生的学习动机,提高学生解决问题的兴趣。

### (四)将小组合作作为参与结构

合作学习是许多学习方式的基础结构,如基于项目的学习(Blumenfeld et al., 1991)与计算机支持的合作学习(Kapur & Kinzer, 2009)。通过双人合作与交互,可以促进学生更好地理解、解释、阐述与评估问题,激活更多的先前知识,并注意到目标概念的深层特征。

然而,近年的研究显示,在采用有效失败的情况下,四五年级小学生开展合作学习的效果不优于单独学习,甚至还低于单独学习(Mazziotti et al., 2019)。玛佐蒂认为,这可能是由于小学生缺乏元认知技能和学习动机,难以充分开展有效失败学习。例如,当小孩子遇到挫折时,他们会选择直接放弃。刘徽等(2020)的研究也显示,如果让五年级学生在有效失败学习中开展合作,那么一旦遇到困难,学生就很容易手足无措。这些结果暗示了有效失败可能更适合初中以上学生。另外,考虑到多个学生开展合作可能会使部分学生被孤立(刘徽等, 2020),教师可采取两人一组的合作方式。

### (五)指导建立在学生的方案上

最后一条原则是教师在讲解目标概念前,须先将学生的解决方案与标准方案进行对比与讨论,让学生明白自己方案的优缺点,特别是自己方案的错误有哪些。如果后续没有专门的课时让每组学生向全班分享自己的解决方案(由于课程规划紧凑,中

国 K-12 课堂往往没有这样的课时安排),那么在解决问题期,教师需要查看学生的解决方案,记录常见的错误方案,或者其它代表性的错误方案。在随后的指导期,教师可以直接带领学生讨论这些不合理方案,并与标准方案对比,帮助学生注意问题的深层结构、目标概念的深层特征,帮助学生修补知识残缺或差错,最终促进高阶知识的学习与更高层次的知识迁移。此外,讨论活动不能被省略或者简化,有效失败活动应至少包含 10-15 分钟的方案对比与讨论。

## 四、思考与总结

K-12 课堂正面临着帮助学生实现知识迁移的挑战。现代迁移理论提出了未来学习准备的观点。本文通过梳理有效失败如何帮助课堂教学有效促进知识迁移,发现有效失败以未来学习准备(动态迁移)、僵局驱动学习等理论为基础,也有详细的学习机制与设计原则。同时,实证研究证明,有效失败能更好地帮助学生学习高阶知识,促进迁移。

有效失败对 STEM 的学习设计有深刻的启发。第一,有效失败能推进我国 STEM 课堂教学方法的变革。当前 STEM 课堂有着较为固定的教学模式,即导入、讲解、练习三个环节,是典型的“先做后教”式教学方法。东亚国家普遍采取这类避免失败型的教学方法,这种选择与文化相关。研究发现,尽管中国与日本的学生比西方学生表现出更好的学习成绩,但东亚学生往往比西方学生更害怕失败,害怕外界的负面信息和对自己的批评(De Castella et al., 2013)。这种文化同样影响 STEM 课堂教学。比如,教师害怕学生遭遇失败,害怕自己的教学失败,会本能地选择先将知识尽可能地传授给学生,再让学生解决问题。然而,实际结果是,比起直接指导,有效失败能更好地帮助学生学习困难知识,促进知识迁移。因此,有效失败能鼓励我国 STEM 教师以更积极、宽容的心态发掘失败的价值,鼓舞学生不要害怕失败,拥抱有效失败带来的积极学习效果。有效失败的提出也使得教师意识到更多创新教学方法的可能性,对传统教学方法进行变革。

第二,有效失败对学习科学增添了新的启示。认知负荷理论认为,学习是运用工作记忆将新信息和新知识整合至已有知识的过程,如果给予学生复杂问题而不给予指导,学生会展开试错和方法-结局



分析,占据大量的工作记忆,导致学习效果低下(Sweller,1988)。因此,斯威勒(Sweller,1988)认为,只有给学生大面积直接指导,才能降低学生的认知负荷,从而保障学习效果。在是否应给予学生直接指导方面,争论已持续十多年(Kirschner et al., 2006),至今依然继续(Kapur,2016)。需明确的是,与无指导的解决问题活动相比,直接指导确实更有效(Kapur,2016)。然而,更重要的是,直接指导的有效不能证明有效失败的无效。恰恰相反,许多实证研究已经证明,直接指导和有效失败都能帮助学习,但有效失败的效果更胜一筹。换句话说,直接指导是有效的,但未必是最有效的。这个结论同样证明,认知负荷理论不能解释所有的学习过程。有效失败的提出为研究学习与认知提供了新的视角,推动了学习科学新研究的发展。

最后,需注意的,有效失败不是“万灵药”,它的运用也有局限。第一,有效失败的价值主要体现在学习高阶知识与知识迁移,对基础的陈述性知识与程序性知识没有优势(Cao et al., 2020; Jacobson et al., 2017; Kapur, 2012)。因此,有效失败的效果与目标知识的类型有关。第二,有效失败的研究以STEM学科为主,本文提及的知识迁移主要涉及STEM领域,可能有一定的局限。最近运用有效失败学习社会科学的研究显示,有效失败的教学效果没有优于传统的直接教学法(Nachtigall et al., 2020)。尽管需要更多的研究证明该结论,但该结果暗示有效失败的效果可能因学科而异。第三,有效失败对学生的元认知与先前知识有要求,因此,有效失败对小学生可能不适用。至少,对于小学生,有效失败的设计需要更精心的研究。

#### [参考文献]

[1] Aamodt, A., & Plaza, E. (1994). Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches[J]. *AI communications*, 7(1):39-59. <https://doi.org/10.3233/AIC-1994-7104>.

[2] Anderson, J. R., Reder, L. M., & Simon, H. A. (1996). Situated learning and education[J]. *Educational Researcher*, 25(4):5-11. <https://doi.org/10.2307/1176775>.

[3] Anderson, M., & Beavis, A. (2018). Teaching for learning transfer: A literature review[R]. [2020]. [https://www.vcaa.vic.edu.au/Documents/viccurric/cct/AndersonBeavis\\_LearningTransferLit-Rev2018.pdf](https://www.vcaa.vic.edu.au/Documents/viccurric/cct/AndersonBeavis_LearningTransferLit-Rev2018.pdf).

[4] Bjork, E. L., & Bjork, R. A. (2011). Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning[M]. In M. A. Gernsbacher & R. W. H. Pew, Leaetta M Pomerantz, James R (Eds.), *Psychology and the real world: Essays illustrating fundamental contributions to society* (pp. 55-64). New York: Worth Publishers.

[5] Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991). Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning[J]. *Educational Psychologist*, 26(3-4):369-398. <https://doi.org/10.1080/00461520.1991.9653139>.

[6] Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (1999). *How people learn: Brain, mind, experience, and school*[M]. Washington, D. C.: National Academy Press.

[7] Bransford, J. D., & Schwartz, D. L. (1999). Rethinking transfer: A simple proposal with multiple implications[J]. *Review of research in education*, 24(1):61-100. <https://doi.org/10.3102/0091732X024001061>.

[8] Cao, L., Jacobson, M. J., Markauskaite, L., & Lai, P. K. (2020). The use of productive failure to learn genetics in a game-based environment[C]. 2020 Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Francisco, CA.

[9] Chi, M. T., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices[J]. *Cognitive science*, 5(2):121-152. [https://doi.org/10.1207/S15516709COG0502\\_2](https://doi.org/10.1207/S15516709COG0502_2).

[10] Chi, M. T., & VanLehn, K. A. (2012). Seeing deep structure from the interactions of surface features[J]. *Educational Psychologist*, 47(3):177-188. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.695709>

[11] De Castella, K., Byrne, D., & Covington, M. (2013). Unmotivated or motivated to fail? A cross-cultural study of achievement motivation, fear of failure, and student disengagement[J]. *Journal of educational psychology*, 105(3):861. <https://doi.org/10.1037/a0032464>.

[12] Detterman, D. K., & Sternberg, R. J. (1993). *Transfer on trial: Intelligence, cognition, and instruction*[M]. New York: Ablex Publishing.

[13] Emihovich, B., Arrington, L., & Xu, X. (2019). Press play! How immersive environments support problem-solving skills and productive failure[M]. In D. Ifenthaler & Y. J. Kim (Eds.), *Game-Based Assessment Revisited* (pp. 121-139). Cham: Springer International Publishing.

[14] Frederiksen, N. (1984). Implications of cognitive theory for instruction in problem solving[J]. *Review of Educational Research*, 54(3):363-407. <https://doi.org/10.3102/00346543054003363>.

[15] Gentner, D., Loewenstein, J., & Thompson, L. (2003). Learning and transfer: A general role for analogical encoding[J]. *Journal of educational psychology*, 95(2):393. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.95.2.393>.

- [16] Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving[J]. *Cognitive psychology*, 12(3):306-355. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90013-4)
- [17] Haskell, R. E. (2000). *Transfer of Learning: Cognition and Instruction*[M]. San Diego: Elsevier Science & Technology.
- [18] Hoffman, B., & Nadelson, L. (2010). Motivational engagement and video gaming: a mixed methods study[J]. *Educational technology research and development*, 58(3):245-270. <https://doi.org/10.1007/s11423-009-9134-9>.
- [19] Hung, C. Y., Sun, J. C. Y., & Yu, P. T. (2015). The benefits of a challenge: student motivation and flow experience in tablet-PC-game-based learning[J]. *Interactive Learning Environments*, 23(2):172-190. <https://doi.org/10.1080/10494820.2014.997248>.
- [20] Jacobson, M. J., Goldwater, M., Markauskaite, L., Lai, P. K., Kapur, M., Roberts, G., & Hilton, C. (2020). Schema abstraction with productive failure and analogical comparison: Learning designs for far across domain transfer[J]. *Learning and Instruction*, 65:101222. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.101222>.
- [21] Jacobson, M. J., Markauskaite, L., Portolese, A., Kapur, M., Lai, P. K., & Roberts, G. (2017). Designs for learning about climate change as a complex system[J]. *Learning and Instruction*, 52:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.03.007>.
- [22] Jonassen, D. H. (1997). Instructional design models for well-structured and III-structured problem-solving learning outcomes[J]. *Educational technology research and development*, 45(1):65-94. <https://doi.org/10.1007/BF02299613>.
- [23] Jonassen, D. H., Howland, J., Moore, J., & Marra, R. M. (2002). *Learning to solve problems with technology: A constructivist perspective*[M] (2nd edition ed.). London: Pearson.
- [24] Kapur, M. (2008). Productive failure[J]. *Cognition and Instruction*, 26(3):379-424. <https://doi.org/10.1080/07370000802212669>.
- [25] Kapur, M. (2010). Productive failure in mathematical problem solving[J]. *Instructional science*, 38(6):523-550. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9093-x>.
- [26] Kapur, M. (2011). A further study of productive failure in mathematical problem solving: unpacking the design components[J]. *Instructional science*, 39(4):561-579. <https://doi.org/10.1007/s11251-010-9144-3>.
- [27] Kapur, M. (2012). Productive failure in learning the concept of variance[J]. *Instructional science*, 40(4):651-672. <https://doi.org/10.1007/s11251-012-9209-6>.
- [28] Kapur, M. (2014). Productive failure in learning math[J]. *Cognitive science*, 38(5):1008-1022. <https://doi.org/10.1111/cogs.12107>.
- [29] Kapur, M. (2015). Learning from productive failure[J]. *Learning: Research and Practice*, 1(1):51-65. <https://doi.org/10.1080/23735082.2015.1002195>.
- [30] Kapur, M. (2018). Examining the preparatory effects of problem generation and solution generation on learning from instruction[J]. *Instructional science*, 46(1):61-76. <https://doi.org/10.1007/s11251-017-9435-z>.
- [31] Kapur, M., & Bielaczyc, K. (2012). Designing for productive failure[J]. *Journal of the Learning Sciences*, 21(1):45-83. <https://doi.org/10.1080/10508406.2011.591717>.
- [32] Kapur, M., & Kinzer, C. K. (2009). Productive failure in CSCL groups[J]. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 4(1):21-46. <https://doi.org/10.1007/s11412-008-9059-z>.
- [33] Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching[J]. *Educational Psychologist*, 41(2):75-86. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102\\_1](https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1).
- [34] Lai, P. K., Portolese, A., & Jacobson, M. J. (2016). Does sequence matter? Productive failure and designing online authentic learning for process engineering[J]. *British Journal of Educational Technology*: <https://doi.org/1217-1227>. 10.1111/bjet.12492.
- [35] Larsen - Freeman, D. (2013). Transfer of learning transformed[J]. *Language learning*, 63:107-129. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9922.2012.00740.x>.
- [36] Lobato, J. (2012). The actor-oriented transfer perspective and its contributions to educational research and practice[J]. *Educational Psychologist*, 47(3):232-247. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.693353>.
- [37] Loibl, K., Roll, I., & Rummel, N. (2017). Towards a theory of when and how problem solving followed by instruction supports learning[J]. *Educational psychology review*, 29(4):693-715. <https://doi.org/10.1007/s10648-016-9379-x>.
- [38] Loibl, K., & Rummel, N. (2014). Knowing what you don't know makes failure productive[J]. *Learning and Instruction*, 34:74-85. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.08.004>.
- [39] Malone, T. W., & Lepper, M. R. (1987). Making learning fun: A taxonomy of intrinsic motivations for learning[M]. In R. E. Snow & M. J. Farr (Eds.), *Aptitude, Learning, and Instruction: Volume III; Cognitive and Affective Process Analyses* (pp. 223-253). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- [40] Margulieux, L. E., & Catrambone, R. (2019). Finding the best types of guidance for constructing self-explanations of subgoals in programming[J]. *The Journal of the learning sciences*, 28(1):108-151. <https://doi.org/10.1080/10508406.2018.1491852>.
- [41] Mazziotti, C., Rummel, N., Deiglmayr, A., & Loibl, K. (2019). Probing boundary conditions of Productive Failure and analyzing the role of young students' collaboration[J]. *Science of Learning*, 4(1):2. <https://doi.org/10.1038/s41539-019-0041-5>.
- [42] Nachtigall, V., Serova, K., & Rummel, N. (2020). When failure fails to be productive: probing the effectiveness of productive failure for learning beyond STEM domains[J]. *Instructional science*, 48

(6):651-697. <https://doi.org/10.1007/s11251-020-09525-2>.

[43] OECD. (2019). PISA 2018 Results (Volume I): What students know and can do[M]. Paris: OECD Publishing.

[44] Perkins, D. N., & Salomon, G. (1992). Transfer of learning[J]. International encyclopedia of education, 2:6452-6457. <https://doi.org/10.1.1.24.369>.

[45] Roelle, J., & Berthold, K. (2016). Effects of comparing contrasting cases and inventing on learning from subsequent instructional explanations[J]. Instructional science, 44(2):147-176. <https://doi.org/10.1007/s11251-016-9368-y>.

[46] Salomon, G., & Perkins, D. N. (1989). Rocky roads to transfer: Rethinking mechanism of a neglected phenomenon[J]. Educational Psychologist, 24(2): 113. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep2402\\_1](https://doi.org/10.1207/s15326985ep2402_1).

[47] Schwartz, D. L., & Martin, T. (2004). Inventing to prepare for future learning: The hidden efficiency of encouraging original student production in statistics instruction[J]. Cognition and Instruction, 22(2):129-184. [https://doi.org/10.1207/s1532690xci2202\\_1](https://doi.org/10.1207/s1532690xci2202_1).

[48] Schworm, S., & Renkl, A. (2006). Computer-supported example-based learning: When instructional explanations reduce self-explanations[J]. Computers & Education, 46(4):426-445. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2004.08.011>.

[49] Sinha, T., & Kapur, M. (2019). When productive failure fails[C]. 2019 Annual Meeting of the Cognitive Science Society.

[50] Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning[J]. Cognitive science, 12(2):257-285. [http://dx.doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](http://dx.doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7).

[51] Tuomi-Gröhn, T., & Engeström, Y. (2003). Conceptualizing transfer: From standard notions to developmental perspectives[M] (T. Tuomi-Gröhn & Y. Engeström Eds.). Oxford: Pergamon Press.

[52] Van Merriënboer, J. J. G. (2013). Perspectives on problem solving and instruction[J]. Computers & Education, 64:153-160. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.11.025>.

[53] VanLehn, K. (1988). Toward a theory of impasse-driven learning[M]. In H. Mandl & A. Lesgold (Eds.), Learning issues for intelligent tutoring systems (pp. 19-41). New York: Springer.

[54] VanLehn, K. (1999). Rule-learning events in the acquisition of a complex skill: An evaluation of CASCADE[J]. The Journal of the learning sciences, 8(1): 71-125. [https://doi.org/10.1207/s15327809jls0801\\_3](https://doi.org/10.1207/s15327809jls0801_3).

[55] VanLehn, K., Siler, S., Murray, C., Yamauchi, T., & Baggett, W. B. (2003). Why do only some events cause learning during human tutoring? [J]. Cognition and Instruction, 21(3):209-249. [https://doi.org/10.1207/S1532690XCI2103\\_01](https://doi.org/10.1207/S1532690XCI2103_01).

[56] Whitton, N. (2018). Playful learning: tools, techniques, and tactics[J]. Research in learning technology, 26(0). VanLehn, K. (1988). Toward a theory of impasse-driven learning[M]. In H. Mandl & A. Lesgold (Eds.), Learning issues for intelligent tutoring systems (pp. 19-41). New York: Springer. <https://doi.org/10.25304/rlt.v26.2035>.

[57] Woodworth, R. S., & Thorndike, E. (1901). The influence of improvement in one mental function upon the efficiency of other functions (I) [J]. Psychological review, 8(3):247. <https://doi.org/10.1037/h0074898>.

[58] 刘徽, 杨佳欣, 徐玲玲, 张朋, 王司闫. (2020). 什么样的失败才是成功之母? ——有效失败视角下的STEM教学设计研究[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 38(6):43-69. <http://dx.doi.org/10.16382/j.cnki.1000-5560.2020.06.004>.

(编辑:徐辉富)

## Productive Failure and the Transfer of Knowledge: Theories, Mechanisms and Design Principles

CAO Lu

(1. Faculty of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** *Achieving the transfer of knowledge is a critical challenge for K-12 STEM education. The transfer is also a key focus of the research in the learning sciences area. As an innovative instructional approach, there has been increased interest in Productive Failure in the last decade. Different from the traditional Direct Instruction approach, Productive Failure lets students solve complex, novel problems first and then followed with the subsequent guidance, which can promote both near and far transfer. This paper summarized Productive Failure from three aspects: learning theories, mechanisms, and design principles. This paper also discusses how Productive Failure could help students learn knowledge and promote transfer. Finally, the implications and limitations of Productive Failure are discussed.*

**Key words:** *productive failure; knowledge transfer; STEM education*