

# 从错误中学习：理论与教学条件设计

张恩铭

(浙江大学教育学院, 杭州 310058)

**[摘要]** 近年来,从错误中学习逐渐受到国际教育心理学界的关注。如何设计从错误中学习的教学条件促进深度学习,成为理论与实践共同关注的议题。本文通过梳理计算模型模拟人类思维过程、记忆提取过程、概念转变和元认知与自我调节四条研究脉络,明确从错误中学习作为高阶学习活动和自我调节学习的内涵,并引入错误学习模型和错误反应模型作为支持证据。本文还通过分析与比较生成效应、问题解决为先、样例学习、概念转变、错误的自主处理和语言学习六个领域的研究,从理论层面指出错误的来源和从错误中学习的时机、方法、形式、过程与结果等教学条件,或是调节既有教学模式效果的重要因素,从而为未来研究提供指南,以及从实践层面讨论如何将错误中学习的理论成果嵌入既有教学设计,为创设利用错误学习的课堂提供启示。

**[关键词]** 从错误中学习;教育心理学;教学设计;高阶学习;自我调节学习

**[中图分类号]** G44 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1007-2179(2023)04-0049-16

错误是宝贵且无处不在的学习资源。然而,课堂教学是否有效利用了学生的错误?学生从错误中获得了多少成长?为什么学生(没有)获得成长?怎样促进学生更好地从错误中学习?尽管珀金森(Perkinson, 1979)宣称,人类学习的本质是从错误中学习(learning from errors),但无论是理论界还是教育实践,都尚未获得足够的见解。一方面,“错误是怎样发挥作用的、怎样利用错误促进学生深度学习、其作用机制在多大程度上是跨领域共通的,或是存在情境差异的”等问题仍待探索;另一方面,在真实课堂上,学生的很多错误被浪费或没有得到建设性回应(Tulis, 2013; Von Kotzebue et al., 2022)。如何使教师创设有利于学生从错误中学习的教学条件或环境成为需要探讨的实践课题。

近年来,从错误中学习这一研究领域受到国际

教育心理学界的关注,但已有综述主要关注微观层面的记忆机制(如 Mera et al., 2022; Metcalfe, 2017),缺少在课堂教与学中观层面的系统梳理。在国内,相关且得到认可的研究领域可能是“有效失败”,但“从错误中学习”可能界定更明确、前景更广阔。一方面,失败更贴近于一种主观感受,而(学习)错误的定义更为明确,即与内部或外部标准不一致的学习过程及表现(Rach et al., 2013; Senders & Moray, 2020)。另一方面,有效失败研究的起点是学生“自己”遭遇失败(Jackson et al., 2022),而从错误中学习不只包括自己的错误(还可能是同伴或教师指定的错误),也不一定非要学生生成错误(如错误样例)。错误既是生成过程的主观产物,也是基于过去经验的客观材料;错误无处不在、随时可用。因此,从错误中学习理论上可以灵活地嵌入包

[收稿日期] 2023-04-05 [修回日期] 2023-06-19 [DOI 编码] 10.13966/j.cnki.kfjyyj.2023.04.006

[基金项目] 浙江大学 2022 年度“博士研究生学术新星培养计划”(2022009)。

[作者简介] 张恩铭,博士研究生,浙江大学教育学院,研究方向:教育心理学与教学设计(definedming@zju.edu.cn)。

[引用信息] 张恩铭(2023). 从错误中学习:理论与教学条件设计[J]. 开放教育研究,29(4): 49-64.

括但不限于有效失败的任何现有教学模式。

## 一、研究脉络

要促进学生从错误中学习,就要先知道(理想的)从错误中学习到底是什么样的。本文通过梳理从错误中学习的研究脉络,寻找对这一问题的可能回应。

### (一)用计算模型模拟人类思维过程

第一条脉络涉及用计算模型模拟人类思维过程。早期学者如布朗和伯顿(Brown & Burton, 1978)讨论了学生减法运算的程序性错误。范冷等(Brown & VanLehn, 1980)用修复理论解释并开发了基于修复策略的人工智能模型(VanLehn, 1987)。之后,他(VanLehn, 1988)创建僵局驱动的学习理论,强调错误规则(mal-rule)较之正确规则的独立性。学生在无法呈现问题解决的后续步骤时陷入僵局,随后根据已有知识,为摆脱僵局作出可能的解释。这些解释所生成的步骤可能是正确的,但当学生不知道正确的规则,或者无法从一堆规则中找到正确的规则时,生成的步骤也可能是错误的。受上述研究启发,本泽夫(Ben-Zeev, 1998)开发了数学原理错误的分类学,范冷(VanLehn, 1999)则提出用于复杂技能学习的Cascade模型。根据该模型,修复其他问题僵局的关键是通过自我解释(Chi et al., 1994)学习样例,并同时将规则和案例存储在记忆中。

### (二)记忆提取过程

第二条脉络围绕记忆的提取过程展开,以生成错误有益于学习为基本观点,以线索回忆测试与外部反馈的循环为基本研究范式(Mera et al., 2022; Metcalfe, 2017),包括三种路径。第一种主要在配对联想学习场景展开(Izawa, 1966; Kornell et al., 2009),探究失败的提取练习本身对正确回应的促进作用。对此,中介假设指出,失败的提取尝试(即错误)作为线索与目标的中介,促进正确目标的提取(Pyc & Rawson, 2010)。第二种关注上述任务中反馈的作用。班格特-德朗斯等(Bangert-Drowns et al., 1991)指出,随着认知主义观点的流行,反馈的作用是通过促进学习者的高通路迁移(Salomon & Globerson, 1987)等思维过程,促进学习者的认知变化,如概念理解、技能获得和自我调节。递归提醒理论和错误预测理论都可能解释反馈效应:前者在

中介假设的基础上,认为反馈帮助学习者将错误和正确的回应编码为同一情景事件,进而存储在长时记忆中(Mera et al., 2022);后者指若学习者预测结果出错,如认为错误答案是正确的,则更关注后续的纠错性反馈并更愿意纠错(Metcalfe, 2017)。错误预测理论可同时用于解释第三种路径所关注的信念等非认知因素的作用。简言之,人的纠错过程可能符合高自信效应,即对自己所犯错误越自信,越容易改正。神经科学证据表明,其原因可能在于惊讶情绪的生成,而再巩固理论认为原因是唤起的害怕情绪的强度(Metcalfe, 2017)。

### (三)学习者的科学概念转变

与前两条不同,第三条脉络源自发展心理学和科学哲学,其焦点是人的概念转变。从发展心理学的角度看,儿童的认知发展体现为认知结构的不断变化,这种变化有阶段性特点,包括同化和顺应两个基本过程(Inhelder & Piaget, 1958)。在科学哲学界,库恩(T. Kuhn)引入“范式”概念,对科学发展作建构主义诠释。科学与人的认知发展有如雪花曲线一般的层次结构,遵循基于已知“吸纳”“同化”未知的逻辑(陈俊, 2007)。在这样的开拓过程中,科学解释的合理性建立在其他解释的不合理之上(Kuhn, 1992),因此,从错误中学习的关键可能是对不同信念进行解释和论证。在这些观点的影响下,波斯纳等(Posner et al., 1982)提出概念转变理论,以解释科学概念的顺应过程;肯德乌等(Kendeou et al., 2014)的知识修正成分框架,揭示了文本阅读影响概念转变的五条原则;林和桑格(Linn & Songer, 1991)以维果斯基的最近发展区概念为基础创建了知识整合理论,并在随后开发的知识整合环境中提供充分的支架(Linn et al., 1999),为帮助教师促进学生概念转变提供操作指南。库恩(Kuhn, 2022)指出,在概念转变过程中,元认知发挥重要作用,这正是第四条脉络的关注点。

### (四)元认知与自我调节

第四条脉络的主角“元认知”,同样扎根于发展和认知心理学。元认知即“关于自我思维过程的思维”“关于认知的认知”(Jaušovec, 2011),而人的犯错过程本质也是一种思维或认知过程,因此元认知可能是人诊断和反思自身错误的结构基础。在发展心理学领域,斯泰尔(Van der Stel, 2011)指

出了元认知发展的年龄阶段特征: 初中阶段(12~15岁)是儿童元认知发展从特殊到一般的关键期。从认知心理学视角看, 元认知的一个重要功能是发现自己心智模型的缺陷(Loibl & Leuders, 2019)。实际上, 元认知在前三条路径中都发挥作用, 但本文仍将其作为第四条脉络, 一是考虑到现代社会对人自我发展的要求越来越高, 二是因为自我调节学习(Zimmerman, 1998)的提出和飞速发展。近年来, 一些研究明确将从错误中学习纳入自我调节学习框架(Keith & Frese, 2005; Safadi & Saadi, 2021; Tulis et al., 2016)。然而, 这些研究主要探究如何在实施与控制阶段提升学习者从错误中学习的效果, 很少将研究范围扩展至在自我调节学习中同样重要的制定目标和反思评估阶段; 另外, 对情绪、动机等非认知因素的自我调节也是学生从错误中学习的重要一环(Tulis et al., 2016), 但相关机制仍缺乏假设和证据(Hatano et al., 2022)。

## 二、内涵与理论模型

### (一) 内涵

上述四条研究脉络, 揭示了从错误中学习作为高阶学习活动和自我调节学习活动的内涵。首先, 从错误中学习作为一项高阶学习活动, 既涉及高阶的学习过程, 又带来高阶的学习结果。关于高阶学习结果, 存在很多一般性的观点和假说。例如, 比格斯(Biggs, 1996)强调知识之间的联系和层次结构, 认为最复杂的知识是可以迁移或自反的整体; 盛群力(2023)指出, 相比于简单的事实和概念, 原理、策略和动力等“为什么”知识更为深化和复杂。这些“知其然, 更知其所以然”的高阶学习结果, 对应高阶的教学与学习过程(Koedinger et al., 2012)。例如, 梅耶(Mayer, 1996)认为组织所选择信息和整合新旧知识是实现深度理解的关键; 季和怀利(Chi & Wylie, 2014)指出高阶学习过程在于建构和交互。从上述四条脉络看, 从错误中学习有关高阶学习过程与结果的观点较为一致: 错误对学习的作用不应停留在案例或事实的累积, 学生需要从错误中学习和理解的, 是错误背后的复杂知识, 如程序、策略和原理, 这些知识的获得使他们遇到完全不同的情境时, 也能作出正确回应。为此, 相关研究广泛使用自我解释、解释性反馈、比较与对比等促进理

解的教学与学习方式, 帮助学生对错误进行探测和反思等高阶认知加工。

其次, 从错误中学习还是一项自我调节学习活动。自我调节学习过程可以从两个方面来审视。第一, 自我调节学习过程的各阶段(准备、表现和评价)始终需要元认知的参与; 第二, 自我调节学习过程不只涉及认知, 还涉及动机和情绪(Panadero, 2017)。因此, 从错误中学习可否算作一项自我调节学习活动, 就看其是否有元认知的参与和涉及认知、动机和情绪方面的监控与调节。根据上述脉络, 学生察觉自己心智模型的错误或缺陷可能是非常关键的环节。这个环节不只发生在学生自己生成和纠正错误之时, 在教师主导的活动中, 学生也可能将外部信息与自己的原有知识对比和整合, 形成并将更合理的知识存入长时记忆。此外, 在整个过程中, 动机和情绪因素都发挥作用。由动机和兴趣等组成的动力系统, 影响学生修正自己认知结构时的最初决策; 在得知错误, 特别是得知自己犯错后, 学生产生的一系列情绪反应和调节过程, 影响学生从错误中学习。

### (二) 理论模型

#### 1. 错误学习模型

张和费奥雷拉(Zhang & Fiorella, 2023)提出的“从自我生成的错误中学习”模型(model of learning from self-generated errors, 下称“错误学习模型”, 见图1)认为, 从错误中学习包括两个过程: 1)生成。学习者激活原有知识(包括内容知识和自我调节知识与技能), 并运用这些知识生成回应; 2)探测和纠正。学习者根据参考信息(reference information)探测和纠正回应中的错误。这一过程共涉及三个关键判定: 第一, 原有知识(包括内容知识、自我调节知识和技能)水平决定了从错误中学习的理论上是否有深度(即图1的分岔路径); 第二, 原有知识水平影响后续认知过程(即比较、加工和自我解释, 该影响没有体现在图1中, 但作者明确指出这一点); 第三, 针对外部参考信息的内部反馈质量决定高原有知识水平学习者从错误中学习的深度。根据这些理论假设, 该模型提出两条从错误中学习的教学设计原则: “生成错误阶段应与学习目标一致, 并支持学生生成与预期内容知识存在语义关联的回应” “探测和纠正错误阶段应帮助学

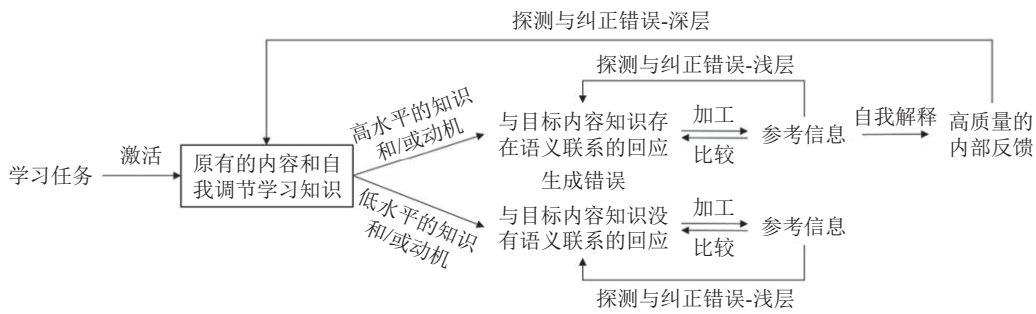


图1 错误学习模型(Zhang & Fiorella, 2023: 24)

生在加工错误和与参考信息比较时自我解释,以生成高质量的内部反馈”(Zhang & Fiorella, 2023: 26)。要注意的是,尽管该模型被提出前,将从错误中学习的学习结果分为保持知识、高阶学习和自我调节学习知识与技能三类,但该模型中的浅层和深层并不对应这些结果类型,而是不同结果类型都有两种状态:浅层错误指可观察的错误行为或回应,深层错误指这些行为或回应背后的知识。

2. 错误反应模型

图利斯等(Tulis et al., 2016)提出的“个体对错误作出反应并从中学习的过程”模型(下称“错误反应模型”,见图2)强调学习者发现犯错后,可能产生的一系列情意(情绪和动机等)和行为即时变化。这些变化受学习者所处的情境和个人固有因素的影响,又与其一同影响后续从错误中学习的过程,即“基于相关元认知活动、认知策略与资源运

用及适应性学习行为的反思与自我解释过程”(Tulis et al., 2016: 19)。这些过程又与其带来的学习结果(学业表现、知识增长、技能发展)一同反作用于情境和个人固有因素,从而完成一次从错误中学习的循环。

总体来看,两个模型本质相似,但各具特色。图利斯等的模型主要以丰富的调查研究为基础和证据(Soncini et al., 2022; Steuer et al., 2022; Steuer & Dresel, 2015; Steuer et al., 2013; Tulis, 2013; Tulis & Ainley, 2011; Tulis et al., 2018),不仅几乎包含错误学习模型的全部要素,还对学习者即时的反应和调节过程提出假设。错误学习模型主要以实验研究为依据,也有自己的特点和优势。首先,该模型强调生成错误的重要性,将生成错误过程与激活原有知识的学习机制和生成多种线索的记忆机制相关联,同时说明设计精良的生成活动对非认知结果可

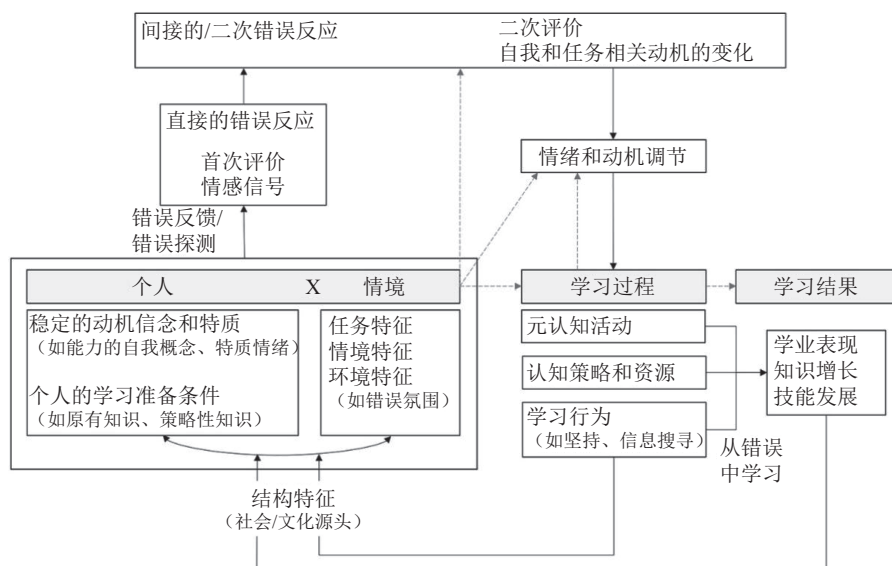


图2 错误反应模型(Tulis et al., 2016: 19)

能带来的好处;其次,该模型就生成和探测与纠正阶段,分别提出提高教学有效性的设计原则,而错误反应模型在这方面存在空白。

要说明的是,这两个模型都是狭义的从错误中学习,只聚焦于学生生成错误后,对自己所犯错误进行探测和反思的过程。但实际上,从错误中学习不一定要要求学生自己生成的错误,同伴错误和教师指定的错误也可利用。本文接下来全面地剖析从错误中学习,为理论发展和实践改进提出见解。

### 三、理论研究图景

从错误中学习涉及六个重要研究领域。它们有的涉及生成过程(生成效应),有的涉及探测与反思过程(样例学习和概念转变),有的同时涉及两个过程(问题解决为先、错误的自主处理和语言学习)。每个领域都将错误作为重要的学习材料。这些研究通过变化促进生成和(或)探测与反思错误的教学条件,调节原本模式的效果。

#### (一)生成效应

认知心理学研究者对测试效应(Rowland, 2014)的机制研究已有数十年。生成效应(generating effect)作为测试效应的进化版术语,指让学习者生成错误,更能促进其对于正确答案的记忆(Metcalfe, 2017)。例如,岩木等(Iwaki et al., 2020)对比了三类干预对大学生陈述性知识学习的影响,其中,先尝试生成目标词汇再接受纠错性反馈的后测得分最高。在教育场景下,生成效应容易触发,如学校测验、教师在课堂上公布答案前让学生先尝试等,都是让学生生成错误的常见方式。

不过,生成错误效应的边界条件有待探究。首先,如何更好地生成错误以促进学习,有团队(Wong, 2023; Wong & Lim, 2022a, 2022b)开展了系列研究以验证故意犯错效应(又称胆大效应):让学习者在知道正确答案的情况下,故意犯合理的(plausible)错误<sup>①</sup>并改正,能促进其知识的保持甚至迁移。其次,生成错误的反馈原则指在没有纠错性反馈的情况下,生成错误可能无法促进学生学习(Metcalfe, 2017)。不过,纠错性反馈的详细程度(如是否在对错的基础上提供正确答案甚至解释)和提供时机(如立即提供还是延迟提供)的作用,目前还存在争议(Golke et al., 2015; Moreno, 2004;

Smith & Kimball, 2010)。从这个角度讲,与其说生成错误能促进学习,不如说生成错误为促进学习提供了宝贵机会,而学生能否抓住这一机会部分地取决于教学条件是否適切(Schenck, 2021)。再次,关于生成错误促进怎样学习,单纯地生成错误可能有助于事实本身而非涉及关联(如概念)的学习(Hausman & Rhodes, 2018)。对此,西布鲁克等(Seabrooke et al., 2019)提示知识间关联性的可能影响:当学习者学习看似不存在语义关联的词时,产生错误会孤立地强化线索和目标,但不会强化线索—目标的关联。最后是非认知因素(如情感、动机等)对生成错误的促学效果的中介与调节作用。在中介作用方面,生成错误可能激发学习者的好奇心(Potts et al., 2019),特别是完成有结构的任务时,未能成功完成任务的经历可能使学习者提高完成后续任务的动机(海明威效应)(Oyama et al., 2018)。在调节作用方面,“骄兵知反”效应(hypercorrection effect)(Carpenter et al., 2018)指学习者对所犯错误更有自信时,在得知自己犯错后的纠错率更高。这可能是因为学习者得知犯错后,会产生惊讶的情绪,进而更关注高自信错误的纠错性反馈,从而提升从错误中学习的表现(Metcalfe, 2017)。此外,期望价值理论对于提高生成错误的有效性可能颇有价值,因为一些学习者即便从生成错误中获得好处,也没有意识到这样做的价值(Wong & Lim, 2022a, 2022b),而在干预前告知学习者可能的好处,或可提高其从错误中学习的元认知表现(Yang et al., 2017)。

#### (二)问题解决为先(有效失败)

在课堂教学领域,教育心理学研究者发起一场问题解决为先(problem-solving prior to instruction)的教学变革。作为代表者之一,卡普尔(Kapur, 2008; Kapur & Bielaczyc, 2012)创建的有效失败(productive failure)教学模式,翻转传统教学“先讲后练”的顺序,将教学单元分为生成和巩固两个阶段。从实际研究看,在生成阶段,学生需面对有挑战的(劣构)问题,以小组合作或独立的形式尽可能生成回应;在巩固阶段,基本模式是教师讲解相关知识、安排练习和提供反馈(Kapur, 2014)。证据表明,有效失败更可能提高学生概念性知识的理解和迁移,而非程序性知识的表现(如 Bego et al., 2023;

Hartmann et al., 2020)。

有效失败与从错误中学习的生成和探测与反思阶段都有联系。在错误生成的过程中, 首先, 学生需要生成尽可能多的表征与解法, 其中有些可能是错误或不完整的。这样做的好处可能是充分激活了学生原有知识。其次, 教师最好向学生说明生成错误的好处, 并不断为学生提供社会与情感支持, 鼓励学生生成错误和解释。在错误探测与反思阶段, 一个有意思的现象是, 并非所有的有效失败研究都满足从错误中学习模型对学习过程的要求。在错误生成阶段后, 一些有效失败研究的教师不再处理这些错误, 而是全部采用正确的教学方式 (Bego et al., 2023; Loibl et al., 2020)。在这种情况下, 学生原则上不能探测和反思错误。然而, 当教师采用比较和对比、纠正和解释、观察和反思等方式, 促进学生探测和反思自己或他人(同伴或指定的典型错误)错误时, 能提高有效失败的效果, 特别是对概念性知识的理解。笔者的元分析研究(未出版)为此提供了证据: 在生成错误后教师帮助学生处理错误(无论是否由学生生成), 能使有效失败与直导教学(direct instruction)相比, 对学生学习结果产生更强的正向影响(两组前后测和两组后测数据的直接对比:  $d = 0.19-0.43$ ; 单组前后测数据的间接对比:  $\beta = 1.84, p < 0.05$ )。辅助证据来自另一项元分析(Sinha & Kapur, 2021), 其发现建立在学生(错误)观念之上的教学, 对于保证有效失败的质量十分重要。

针对上述两种活动, 基于生成效应的小粒度研究提供了类似的机制假设, 但已有研究尚未将生成效应与有效失败联系在一起。例如, 搜寻集合理论(search set theory)认为, 提取尝试会激活多个语义相关的选择, 而反馈将强化在众多候选中目标的编码, 从而增强正确目标与线索之间的对应关系(Mera et al., 2022), 这似乎分别对应有效失败的生成和巩固过程。此外, 如前所述, 错误自信等研究也关注非认知因素对学习结果的影响。

### (三) 样例学习(错误样例)

样例学习(example-based learning)是与从错误中学习有关的第三个研究领域, 可用来促进学生对于复杂知识的学习。样例学习包括工作样例、类比推理和观察学习三个细分领域(Renkl, 2014)。

其中, 书面样例或人工模型可能正确, 也可能错误。因此, 样例学习与从错误中学习的连结点, 就在于错误样例, 相应的学习过程是对错误的探测与反思。试想, 如果教师用错误的工作样例展开教学, 学生能否学得更好? 如果让学生观察错误的模型样例, 他们又能否学得更好? 与预期相反, 巴比里等(Barbieri et al., 2023)发现, 从正确样例中学习, 反而要比从错误样例或正误对比样例中学习, 数学学习效果更好( $\beta = 0.24, p < 0.05$ )。然而, 这一结论的精细度较差, 需要谨慎对待: 首先, 正误对比样例和只有错误样例的效果哪个更好? 一般情况下, 正误对比样例是更好的学习材料, 因为它可以使学习者通过比较和对比, 关注样例背后的关键信息, 促进对材料的生成加工(Van Peppen et al., 2021)。但在什么情况下正误对比样例的效果更好, 仍需探索(Booth et al., 2013)。其次, 错误样例或正误对比样例对怎样的学生学习效果更好? 一方面, 原有知识可能调节错误样例或正误对比样例的效果, 目前对于调节作用的方向和大小还存在争议(Barbieri & Booth, 2016; Heemsoth & Heinze, 2014); 另一方面, 学生自己的错误与样例错误是否一致可能是重要的调节因素, 一致性高的学生可能从错误样例中学得更好(Loibl & Leuders, 2019)。最后, 除了错误样例或正误对比样例, 额外的支持手段有什么影响? 诸如解释性反馈(Corral & Carpenter, 2020)、反思与比较提示(Durkin & Rittle-Johnson, 2012)、自我解释提示(Begolli et al., 2021)、诊断量规(Safadi, 2022)等教学支持, 可能促进学生对材料(样例)的主动加工, 从而更好地发现问题的特征并从中学习, 而不是局限于表面的细节。不过, 这些手段究竟是同等地提升两类样例对学生学习的效果, 还是起怎样的调节作用, 仍是未知数。

基于从错误中学习的角度, 样例学习与有效失败的联系主要表现为学习错误样例或模型的方法, 可用来提高有效失败的效果。例如, 在有效失败的巩固阶段, 教师可能只解释正确的样例或讲解正确的知识, 但也可能将学生的典型错误与正确样例加以比较。在后一种情况下, 学生的典型错误实际充当了错误样例的角色。洛布尔和拉梅尔(Loibl & Rummel, 2014)设计的教学顺序×对比样例 2×2 实验结果表明, 无论教学顺序如何, 教师比较学生的

错误与正确样例都能提升其概念性知识测试表现,并且只有在教师比较学生错误与正确样例的情况下,有效失败的顺序(先问题解决再教学)才优于传统模式的顺序(先教学再问题解决)。又如,在有效失败的生成阶段,观察别人的失败可作为自我生成的替代方案。尽管总体上看,观察别人的失败不如自我生成让学生学得好,但观察什么十分关键。哈特曼等(Hartmann et al., 2020, 2021, 2022)的研究表明,观察别人失败的过程要比观察其结果,更有利于学生概念性知识的学习。

#### (四)概念转变(反驳文本等)

学生在科学学习时有时会有很多迷思概念(misconception),在日常生活中,有时会“恍然大悟”,发现自己之前坚信不疑的观点其实并不正确。上述两个现象对应概念转变研究的两个场景——理科学习和日常的迷思概念形成。

首先,人为什么会形成迷思概念?或者说人是怎样发展迷思概念的?从信息源角度看,迷思概念的形成可能是信息本身存在错误。这种错误信息一般具有新奇性,从而引发人的惊讶情绪,进而受人重视;其传播在远度、速度和深度上都数倍乃至数十倍地胜于正确信息(Vosoughi et al., 2018)。从信息传递角度看,迷思概念的形成还有一种可能在于,在信息传递者与接收者之间存在错误沟通,如二者间存在语言阻碍(Hoffman, 2011)。从概念特征角度看,一些科学概念非常复杂,其内部存在各种关联和因果。当学生只对它们作简单、模式化的理解时,就会将这些非线性的过程(如扩散)错误地表征为实体(如扩散平衡是静态的)或结构有缺失的线性过程,如分子向低浓度方向运动,这是一种宏观上正确,但微观上不正确的解释(Chi, 2005; Chi et al., 2012)。尽管这些解释角度不同,但共识是,迷思概念非常顽固、难以被彻底纠正。根据真相错觉效应,人倾向于相信重复多次的错误信息,即便自己曾将其编码为错误的(Fazio et al., 2015)。根据持续影响效应,当人们接触错误信息后,这些信息就算被撤回,后续还是会对人的信念、记忆和推理造成负面影响(Miller et al., 2022)。

因此,第二个问题,怎样更好地纠正人的迷思概念,是一个很有意义但同时极具挑战的课题。首先要明确一点的是,以迷思概念的转变为目标或结

果的概念转变研究,不一定以错误为材料或资源(Çetin et al., 2009; Loibl et al., 2020; Schwartz et al., 2011; Swanson & Trninic, 2021)。因此,这些研究不属于从错误中学习的范畴。至于通过让学生从错误中学习,纠正其迷思概念的研究,则可能涉及认知和全面两种路径。在认知路径方面,反驳文本(refutation text)或概念转变文本(conceptual change text)可能是一种有效的教学手段。基本模式是首先点明迷思概念是什么,然后解释为什么这是错误的,并呈现正确的答案和(或)解释。施罗德和库塞拉(Schroeder & Kucera, 2022)针对33项研究的元分析结果表明,反驳文本可以中等地促进学生学习( $g = 0.41$ )。这种促进作用的出现,可能是因为文本激活了学生长时记忆中的原有知识,而这个激活过程促进了文本中的新奇信息与原有知识的整合。概念转变的成功与否,就看之后的激活中,新奇信息能否战胜原有知识(Schroeder & Kucera, 2022)。反驳文本对中小学生的促学效果( $g = 0.49-0.71$ )要明显优于大学生( $g = 0.33$ ),但鉴于中小学生的样本量只有大学生的30%,对这一结果需保持谨慎。

与反驳文本相比,平特里希等(Pintrich et al., 1993)基于社会认知视角提出的更全面的概念转变促进框架,综合考虑了环境、动机和认知因素。对应的干预手段,相较于反驳文本也更加宏大,涉及各种体验式的学习环境(实验室、仿真平台、游戏等)。例如,冈斯顿和怀特(Gunstone & White, 1981)提出的用于科学概念转变的“预测—观察—解释”策略,强调让学生主动参与提出假设、观察现象和解释现象的过程,其中观察可在实验室现场或技术环境下完成(Nawaz et al., 2022)。通过主动调整与观察,学生可以直观地发现复杂概念的内部关系,纠正简单或错误的理解。不过,教师在创设体验式环境促进学生概念转变时,需要关注与学习无关但有趣要素的影响。蔡斯等(Chase et al., 2021)发现,把商业编程游戏的叙事、性能指标和高质量图像与声音去掉后,初中生反而更能容忍编码错误,并获得更多的编码知识。这表明,使学生投入从错误中学习的要义,可能并不来自于降低难度或增加花边细节。

可以看出,概念转变研究在促进学生从错误中学习的机制方面,与错误样例和有效失败有相通之



处, 都指出对原有知识的充分激活和对错误的深度处理(探测与反思)的重要性。这些研究的侧重不同, 其干预模式也存在差异: 有效失败研究基本都要学生先生成错误, 但不一定处理生成的错误(尽管处理错误可能使学生学得更好); 错误样例研究不需要学生生成错误, 但要对错误进行有意识地处理; 概念转变研究在生成和处理错误两方面的做法更加中立, 并取决于具体的教学方式: 教师可以灵活运用各种处理错误方法, 为学生概念转变过程提供帮扶。但无论如何, 关键在于当恰当地生成和处理错误时, 这些模式都能更好地实现学生对概念或复杂知识的理解与迁移。因此, 若我们再回首教育心理学界那场旷日持久的争论: 是先发现学习再直导教学, 还是反过来更好(Van Harsel et al., 2019)? 从错误中学习的可能回应是: 不妨先从“顺序之争”中跳出来, 思考怎样改进促进错误生成和处理的教學条件, 帮助学生实现预期的深度学习结果。

#### (五) 错误的自主处理

自主处理的相关研究主要关注学生从自己的错误中学习的自我调节过程。根据错误学习模型和错误反应模型, 这种自我调节过程可能涉及情绪和行为方面的反应与调节、自我调节学习策略(如利用外部资源、提供内部反馈)的使用、对材料的主动认知加工等。正是这些过程, 学生获得知识增长和信念转变等学习结果。要说明的是, 本文只是用自主处理这一统称囊括自我评估(self-assessment; Zamora et al., 2018)、自我诊断(self-diagnosis; Safadi, 2018)、自我纠正(self-correction; Silva et al., 2021)和教训归纳(lesson induction; 小濑彩子, 2018)等语词, 这种语词间的映射是单向的。例如, 对错误的自主处理可以通过自我评估实现, 但并非所有的自我评估都涉及对错误的自主处理。

研究者可从教学法和学习法立场审视学生对错误的自主处理。这两个立场的区别在于, 前者关注教师如何帮扶学生有效地从错误中学习, 后者将从错误中学习视为面向未来的能力, 因此相比于“当下”的有效, 后者更关注如何促进学生掌握相关策略。从教学法的角度看, 有效地从错误中学习需要恰当的参考信息, 如知识提示(Zhang, 2022)、工作样例和量规(Safadi & Saadi, 2021)、纠错性与解释性反馈(Asterhan & Dotan, 2018; Bangert-Drowns

et al., 1991)等。外部信息的多寡和不同组合可能影响学生从错误中学习的效果, 如张(Zhang, 2022)发现, 与提供正确解法相比, 提供对问题背后所需复杂知识的提示, 或同时提供提示与解法, 更有助于学生自主地从数学考试错误中学习。另外, 促进内部反馈的认知和元认知提示(Heemsoth & Heinze, 2016; Nückles et al., 2020)也很重要。萨巴迪和萨迪(Safadi & Saadi, 2021)的研究整合工作样例量规(外部)和自我诊断提示(内部)反馈, 在提高学生学业成绩的同时, 促进了学生的概念转变。从学习法的角度看, 有效地从错误中学习可能受益于策略的获得和长期潜移默化的影响。例如, 植阪友理等(2022)通过学习法讲座, 帮助中学生理解教训归纳学习策略; 教师不是被动的一次性活动组织者, 而是通过日常教学长期向学生提及教训归纳的要点, 使从错误中学习不仅作为学生的一项能力, 更成为一种思维习惯。

自主处理涉及从错误中学习的探测与反思过程。探测涉及察觉错误事实、发现错误地点、明确错误类型等子过程, 与元认知监控和判断等技能关系紧密。反思涉及解释错误原因和做出纠错行动的子过程, 深度的反思对元认知和认知能力要求较高(Ohlsson, 1996; Rach et al., 2013; Senders & Moray, 2020; Tulis et al., 2016; Zapf & Reason, 1994; Zhao, 2011)。因此, 自主处理错误带来的学习结果, 理论上既包括监控准确性等元认知技能的发展, 也包括知识获得、迁移等认知结果的提升, 但目前测量认知结果的多, 测量元认知结果的少。另外, 学生自主处理错误的行为背后, 可能存在强大的动力“黑箱”。关于学生如何看待和决定(怎样)处理或不处理某个特定错误, 以及包括兴趣、好奇心、信念和动机等的动力系统与从错误中学习的过程的长期相互影响, 还有很大的研究空间。

#### (六) 语言学习(错误反馈)

数学/理科学习与语言学习的研究往往既互不引用也互不参考。但实际上, 教师或技术辅助的指导系统所提供的错误反馈(error feedback), 是二者共用的常用技术。反馈在语言学习研究中被使用的频率远大于数学/理科学习的相关研究。这可能是因为, 相比于数学/理科学习, 研究者的主要目的是让学生实现对知识(特别是概念性知识)的深度



理解,很多语言学习研究的目的不仅是促进学生的知识(如语法知识)获得,还包括提升相关技能的熟练度(如阅读流畅性, Kolić-Vehovec, 2002; 口译流畅性, L. Yang, 2018)。反馈在语言教育中的好处,较为经典的来自施密特(R. Schmidt): 纠错性反馈可使学生有意识地注意和理解错误、纠正信息,从而学得更好(Sheen, 2010)。

尽管错误反馈对各阶段学生语言学习的好处得到公认,但不同的反馈特征可能带来不同的结果。首先,在反馈形式方面,研究者除了使用数学/理科学习常用的书面反馈改进学生的写作质量,也常使用口头反馈,如师生或生生间的对话式反馈,纠正口头的语法错误等(Sato & Lyster, 2012; Thomas, 2018)。总体上看,书面和口头反馈能很大程度上促进学生的语言学习,但书面反馈的效果可能相对略优(Li, 2010; Schenck, 2021)。其次,在反馈类型方面,研究者可能提供直接的纠错反馈(如重述),也可能提供间接反馈,包括标记错误地点、错误类型、提示相关规则(元语言反馈)等。如果仅提供书面反馈,似乎只有中等程度的有效(效果量 0.5 左右)且不同类型间没有效果上的差异,但同时使用直接反馈和元语言反馈,可能更有助于提升语言学习效果(Brown et al., 2023)。不过,由于这里的“效果”指总体效果,因此真正面对特定任务时,还需考虑不同反馈类型的作用机制和边界条件,以选择最优反馈。申克(Schenck, 2021)指出了最优反馈类型与所学语法复杂度的匹配关系: 面对复杂的语法特征,直接的再形成(reformulation)反馈(如重述、直接反馈)提供更大程度的帮扶; 对于简单的语法特征,间接的反馈(如提示)提供更小程度的帮扶。又如,欣特尼和埃利斯(Shintani & Ellis, 2013)发现,元语言解释可能在学习初期有效,后续会随学习的推进而递减。

综上,促进从错误中学习的教学将错误视为一种学习材料或资源,它不是独立的宏大模式,而是基于当前教学现状的“踉踉脚、够得到”的“扩展包”。正如前面所阐明的那样: 当有关从错误中学习的教学条件变量发生变化时,已有模式原本的效果也可能被调节,这就为解密特定教学模式促进学生学习的“黑箱”提供了新的研究视野和可能性。从错误中学习就是在这样的“夹缝”中生存,

并彰显自身的研究价值和实践意义。

#### 四、实践启示

目前来看,已有研究的理论证据虽然有些混杂,但也能达成一些共识。本文综合相关研究结论,初步提出将从错误中学习嵌入教学设计的框架(下称“错误嵌入框架”)。本框架可为研究者开展相关理论与实证研究提供参考,也可与实践者利用这一框架改进教学设计提供指南。

##### (一) 错误嵌入框架

错误嵌入框架包括可能影响从错误中学习效果的两个前提和六个错误特征变量(见图 3)。两个前提分别是意义说明与理解、明确学生“绊脚石”; 它们很少在相关研究中明确出现,但在一般性研究中获得广泛认可。首先,根据期待—价值理论,当一个人享受从错误中学习的过程,认识到该过程的重要性,认为该过程对未来学习有帮助,且相对花费较少精力时,就可能更主动地参与这一过程(Leaper, 2011)。因此,研究者(教师)决定推广从错误中学习时,最好先向教师(学生)阐明这样做的意义。此外,作为另一个通用观念,明确“绊脚石”的重要性不言自明——如果你想解决一个问题,那么首先要知道这个问题及其产生的根源是什么。在一些教学模式中,明确学生的“绊脚石”是保证教学和学习质量的前提(Uesaka et al., 2017; 张恩铭, 2022)。

错误嵌入框架还包括六个错误特征变量。其中,错误来源包括自己的错误、同伴的错误(如同组或班级其他同学的错误)和教师指定的错误(如班级、年级或教师根据过往经验确定的错误)。错误学习时机指从错误中学习活动可以根据需要嵌入教师在一段时间内教学所采用的教学范式。这些范式可分为发现学习(如小组合作)和直导教学(如教师讲解)。错误学习方法包括鼓励与提示(如鼓励学生继续挑战难题、提示可能的思考方向)、比较与对比(如对比正确和错误的样例)、纠正与解释(如解释某一迷思概念为什么是错误的,或让学生自我解释错误)和观察与评价(如观察和评价其他同学的犯错过程)。错误学习形式涉及合作学习、教师主导以及在有无支架情况下的自主学习; 错误学习过程,包括生成、探测和反思,其中

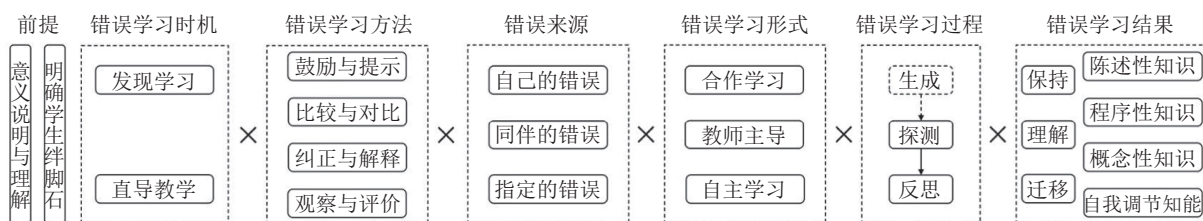


图3 错误嵌入框架

生成过程不一定在所有教学活动中都涉及; 错误学习结果包括内容相关的陈述性(事实)、概念性(概念、原则、原理等)与程序性(产生式、规则、程序、策略等)知识和自我调节学习知识与技能, 以及这些知识类型的学习层次, 包括保持、理解和迁移。

教师开展从错误中学习可以先考虑两个前提: 学生理解为什么或如何从错误中学习吗? 学生错误背后的“绊脚石”是什么? 再从学习结果出发, 逆向确定教学条件。例如, 教学目标是让学生理解分数特征的概念性知识, 这可能需要找到出错的地方和分析错误原因。这个过程可通过同伴合作的形式完成; 接着, 教师指定分数特征的典型错误, 并设计包含这一错误的样例, 以便学生将其与正确样例比较; 整个过程嵌入直导教学环节(如在讲解概念后), 可能需要五分钟。但这种形式的选择与组合往往基于经验, 教师可能难以就是否以及在多大程度上奏效作出预判。为了创建更有效地从错误中学习的课堂, 本文结合从错误中学习的机制假设, 提出教师设计从错误中学习需考虑的原则。

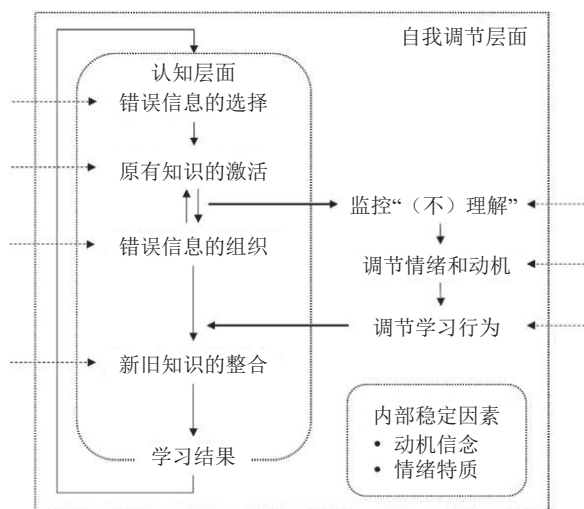
(二) 运用原则

上述框架可回应教师如何设计从错误中学习的教学条件, 但不能解决为什么要这样而不是那样设计的问题。因此, 本文构建从错误中学习的机制假设, 并提出三条运用原则。这些原则可作为思维模式(mindset), 引领教师借此实现学生的深度学习结果。

1. 从错误中学习的机制假设

要成功运用错误嵌入框架, 首先要理解学生怎样从错误中学习。梅耶(Mayer, 1996)提出的关于“人如何学习”的一般性观点, 包括学生在工作记忆中组织所选择的信息, 并将加工过的信息与从长时记忆中提取的原有知识进行整合, 以实现深度学习。在此基础上, 本文结合上述六个领域的共通结论和理论基础(Kendeou et al., 2014; Loibl et al., 2017;

Metcalfe, 2017; Tulis et al., 2016; Zhang & Fiorella, 2023), 提出从错误中学习的机制假设<sup>②</sup>(见图4): 首先, 学生选择要加工的错误信息。其次, 学生激活原有知识并对这些信息进行加工, 这两个过程可能同时进行, 也可能交替进行。最后, 学生在工作记忆中将加工后的错误信息与原有知识进行整合, 并将整合后的结构存入长时记忆。不过, 单纯开展这一过程, 学生不一定能有效地从错误中学习, 因为虽然新信息可能包含若干有深度的特征, 并且学生可能通过组织过程学习这些特征, 但学生可能不知道自己是否在这些特征上有所欠缺, 从而在整合新旧知识的过程中遇到困难(Loibl et al., 2017)。因此, 在激活原有知识和组织外部信息的过程中, 学生需要监控自己的“理解”与“不理解”, 进而调节自己的情绪、动机和后续学习行为。这种监控既关注认知状态, 也关注情绪状态。在认知方面, 监控可以是浅层的(只关注细节和表面特征), 也可以是深度的(关注基本原理和深层特征), 如不仅知道自己不理解某个概念或策略, 还认识到无法解释



注: 虚线箭头表示外部教学可能的干预

图4 从错误中学习的机制假设

清楚这个复杂结构的哪些方面,或为什么不理解。在情绪方面,监控使学生意识到自己对错误的反应,如在生成错误时的自信或不安、在得知犯错时的惊讶等,这会影响到学生后续的情绪和行为调节过程。简言之,开启高质量的从错误中学习之“锁”,需要将学生的“原来”感悟作为“钥匙”——原来我是这里不明白啊!如果没有这样的过程,学生会主观认为之后的课堂都与自身进步无关。另外,这把“钥匙”的制作,不一定非要学生自己生成错误,但对教师判断学生“绊脚石”的要求很高:如果教师判断不准确或没有深度,那么教学材料中的错误与学生真正的错误将相去甚远,之后的课堂也就在客观上与学生的进步无关了。

## 2. 运用原则

基于上述机制假设,使学生从错误中学习的过程更加有效,应该怎样选择教学条件?教师如何解释做出这样而不是那样的选择?对此,教师需要始终牢记错误嵌入框架的三条运用原则。

### 1) 停止关注表象,探寻错误本质

从错误中学习可与疾病诊断相类比:病人可能症状相似,但病灶全然不同;也可能症状完全不同,但病灶几乎相同。因此,从错误中学习的教学干预研究强调探寻错误背后的原理,以促进学习者对各种知识类型的长期保持、理解和迁移。探寻涉及两个场景:一是教师在学情诊断过程中探寻学生可能的错误本质,并据此设计包含指定错误的学习材料;二是师生在教学现场探寻作为学习材料的错误的本质。这些错误不光是教师提前设计好的,还可能是学生及其同伴生成的。对于指定的错误,教师可通过对比、解释、提示等方法,促进学生组织错误材料;对于同伴和学生自己的错误,教师可通过解释、提示、反馈等方法,结合小组合作形式,帮助学生监控到这个错误并使其意识到可能的深层次原因。从自我调节学习角度看,教师可以有意识地将这些教学技法,转化为学生可以运用的学习方法。无论如何,教师和学生都要避免做关于学了什么、没学什么、哪个知识点不会的简单探寻,而要着眼于为什么出现这个错误等关键问题。如学生没有做出ABC,是因为其不理解DEF的现象在GHI的背景下才成立。因此,无论教师或学生选择何种教或学,都要保证加工的材料包含需要理解的复杂特

征,且学生对这些特征进行有意的认知加工,如呈现学生的错误并向学生解释错误原因后,教师可能需要让学生同伴之间互相解释并确认理解与否,并设计基于类似原理的扩展活动深化学生理解(Uesaka et al., 2017)。另外,当学习内容较难,或发现学生仍不理解时,教师可能要适当增加帮扶程度,提供更明确和直接的参考信息。

### 2) 先明确结果,再考虑其他变量

运用错误嵌入框架的第二条原则涉及教学设计的顺序:为什么教师应先思考从错误中学习的结果呢?强调目标为本的现代教学设计理念只是一方面。更重要的是,多个相关领域的研究表明,当预期学习结果发生变化时,基于错误嵌入框架的最优选择也可能发生变化。例如,假设你希望促进学生对程序性知识的理解(如更快更准确地运用规则),那么相比于给学生复杂问题、让学生尽可能多地生成解法,跳过生成过程、直接让学生探测和反思错误,可能是更好的选择。如果教师喜欢先生成错误的授课方式,但目标学习结果仍然是程序性知识,那么也可以对学习材料(如上述复杂问题)进行优化,如设计只涉及需要理解的程序性知识的复杂问题(Ziegler et al., 2021)。

### 3) 要熟悉“树木”,更要俯瞰“森林”

“树木”指不同学科乃至不同学科的具体话题,“森林”就是这些话题的集合。在遵循前两条教学条件设计原则的情况下,学生可以身处“森林”中,有深度地学习每棵“树木”乃至树木之间的关系,但这样的学生只能“听令行事”,始终无法成为自我学习的指引者。因此,学生需要采用一种学科知识之上的“俯瞰”视角,包括涉及元认知(监控和调节)的一切结构,如一般性的学习策略及影响这些策略自发运用的动机等。缺乏这种视角可能使很多本应起到作用的教学干预失效。例如,在从自己的错误中学习的场景下,教师让学生在测试后通过发放的答案在笔记本上纠错,如果学生采用抄写答案、没有与自己的认知结构相联系等“浅层”笔记模式(Liu & Uesaka, 2022),那么可以预见学生只获得浅层学习结果(如将这道题的答案当作事实记住)。因此,教师运用错误嵌入框架的另一条重要原则,就是要牢记今天用于教学设计的错误嵌入框架,明天应成为学生自己从错误中学习的工

具。教师需有理有据地将该工具涉及的各项学习策略明确地教给学生, 并提供持续的练习机会。当然, 实现这一目标, 必须有更多的研究者承担起深化基础研究并将研究发现转化为实践的职责。

#### [ 注释 ]

①例如, 对“蝙蝠(bats)是可以飞的哺乳动物”这条陈述, 主试指示被试故意犯合理的概念性错误和改正这个错误, 并举例: “蝙蝠(batz)是可以飞的哺乳动物”不是概念性错误, 只是拼写错误。合理错误的示范性回应如“蝙蝠是可以飞的鸟类(哺乳动物)” (Wong, 2023: 16)。

②关于机制的构想可能需要进一步的理论论证和实证检验, 但这属于后续工作, 超出本文讨论范围。

#### [ 参考文献 ]

- [1] Asterhan, C. S. C., & Dotan, A.(2018). Feedback that corrects and contrasts students' erroneous solutions with expert ones improves expository instruction for conceptual change[J]. *Instructional Science*, 46(3): 337-355.
- [2] Bangert-Drowns, R. L., Kulik, C.-L. C., Kulik, J. A., & Morgan, M.(1991). The instructional effect of feedback in test-like events[J]. *Review of Educational Research*, 61(2): 213-238.
- [3] Barbieri, C. A., & Booth, J. L.(2016). Support for struggling students in algebra: Contributions of incorrect worked examples[J]. *Learning and Individual Differences*, 48: 36-44.
- [4] Barbieri, C. A., Miller-Cotto, D., Clerjuste, S. N., & Chawla, K.(2023). A meta-analysis of the worked examples effect on mathematics performance[J]. *Educational Psychology Review*, 35(1): 11.
- [5] Bego, C. R., Chastain, R. J., & DeCaro, M. S.(2023). Designing novel activities before instruction: Use of contrasting cases and a rich dataset[J]. *British Journal of Educational Psychology*, 93(1): 299-317.
- [6] Begolli, K. N., Dai, T., McGinn, K. M., & Booth, J. L.(2021). Could probability be out of proportion? Self-explanation and example-based practice help students with lower proportional reasoning skills learn probability[J]. *Instructional Science*, 49(4): 441-473.
- [7] Ben-Zeev, T.(1998). Rational errors and the mathematical mind[J]. *Review of General Psychology*, 2(4): 366-383.
- [8] Biggs, J.(1996). Enhancing teaching through constructive alignment[J]. *Higher Education*, 32(3): 347-364.
- [9] Booth, J. L., Lange, K. E., Koedinger, K. R., & Newton, K. J.(2013). Using example problems to improve student learning in algebra: Differentiating between correct and incorrect examples[J]. *Learning and Instruction*, 25: 24-34.
- [10] Brown, J. S., & Burton, R. R.(1978). Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills[J]. *Cognitive Science*, 2(2): 155-192.
- [11] Brown, D., Liu, Q., & Norouzian, R. (2023). Effectiveness of written corrective feedback in developing L2 accuracy: A Bayesian meta-analysis[J]. *Language Teaching Research*: 13621688221147374.
- [12] Brown, J. S., & VanLehn, K.(1980). Repair theory: A generative theory of bugs in procedural skills[J]. *Cognitive Science*, 4(4): 379-426.
- [13] Carpenter, S. K., Haynes, C. L., Corral, D., & Yeung, K. L.(2018). Hypercorrection of high-confidence errors in the classroom[J]. *Memory*, 26(10): 1379-1384.
- [14] Çetin, P. S., Kaya, E., & Geban, Ö.(2009). Facilitating conceptual change in gases concepts[J]. *Journal of Science Education and Technology*, 18(2): 130-137.
- [15] Chase, C. C., Malkiewich, L. J., Lee, A., Slater, S., Choi, A., & Xing, C.(2021). Can typical game features have unintended consequences? A study of players' learning and reactions to challenge and failure in an educational programming game[J]. *British Journal of Educational Technology*, 52(1): 57-74.
- [16] 陈俊(2007). 库恩“范式”的本质及认识论意蕴[J]. *自然辩证法研究*, 23(11): 104-108.
- [17] Chi, M. T. H.(2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust[J]. *Journal of the Learning Sciences*, 14(2): 161-199.
- [18] Chi, M. T. H., De Leeuw, N., Chiu, M.-H., & Lavancher, C.(1994). Eliciting self-explanations improves understanding[J]. *Cognitive Science*, 18(3): 439-477.
- [19] Chi, M. T. H., Roscoe, R. D., Slotta, J. D., Roy, M., & Chase, C. C.(2012). Misconceived causal explanations for emergent processes[J]. *Cognitive Science*, 36(1): 1-61.
- [20] Chi, M. T. H., & Wylie, R.(2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes[J]. *Educational Psychologist*, 49(4): 219-243.
- [21] Corral, D., & Carpenter, S. K.(2020). Facilitating transfer through incorrect examples and explanatory feedback[J]. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 73(9): 1340-1359.
- [22] Durkin, K., & Rittle-Johnson, B.(2012). The effectiveness of using incorrect examples to support learning about decimal magnitude[J]. *Learning and Instruction*, 22(3): 206-214.
- [23] Fazio, L. K., Brashier, N. M., Payne, B. K., & Marsh, E. J.(2015). Knowledge does not protect against illusory truth[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 144(5): 993-1002.
- [24] Golke, S., Dörfler, T., & Artelt, C.(2015). The impact of elaborated feedback on text comprehension within a computer-based assessment[J]. *Learning and Instruction*, 39: 123-136.
- [25] Gunstone, R. F., & White, R. T.(1981). Understanding of gravity[J]. *Science Education*, 65(3): 291-299.
- [26] Hartmann, C., Van Gog, T., & Rummel, N.(2020). Do examples of failure effectively prepare students for learning from subsequent instruction?[J]. *Applied Cognitive Psychology*, 34(4): 879-889.
- [27] Hartmann, C., Van Gog, T., & Rummel, N.(2021). Preparatory effects of problem solving versus studying examples prior to instruction[J]. *Instructional Science*, 49(1): 1-21.
- [28] Hartmann, C., Van Gog, T., & Rummel, N.(2022). Productive versus vicarious failure: Do students need to fail themselves in order to

- learn?[J]. *Applied Cognitive Psychology*, 36(6): 1219-1233.
- [29] Hatano, A., Ogulmus, C., Shigemasu, H., & Murayama, K.(2022). Thinking about thinking: People underestimate how enjoyable and engaging just waiting is[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(12): 3213-3229.
- [30] Hausman, H., & Rhodes, M. G.(2018). When pretesting fails to enhance learning concepts from reading texts[J]. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 24(3): 331-346.
- [31] Heemsoth, T., & Heinze, A.(2014). The impact of incorrect examples on learning fractions: A field experiment with 6th grade students[J]. *Instructional Science*, 42(4): 639-660.
- [32] Heemsoth, T., & Heinze, A.(2016). Secondary school students learning from reflections on the rationale behind self-made errors: A field experiment[J]. *Journal of Experimental Education*, 84(1): 98-118.
- [33] Hoffman, A. R.(2011). Do you hear what i'm sayin'?: Overcoming miscommunications between music teachers and students[J]. *Music Educators Journal*, 97(4): 33-36.
- [34] Inhelder, B., & Piaget, J. (1958). *Adolescent thinking*[A]. *The Growth of Logical Thinking: From Childhood to Adolescence*[M]. New York, NY: Basic Books, 334-350.
- [35] Iwaki, N., Tomisawa, M., Suzumori, R., Kikuchi, A., Takahashi, I., Tanaka, S., et al.(2020). Is perceiving another's error detrimental to learning from corrective feedback?[J]. *Cogent Psychology*, 7(1): 1717052.
- [36] Izawa, C.(1966). Reinforcement-test sequences in paired-associate learning[J]. *Psychological Reports*, 18(3): 879-919.
- [37] Jackson, A., Godwin, A., Bartholomew, S., & Mentzer, N.(2022). Learning from failure: A systematized review[J]. *International Journal of Technology and Design Education*, 32: 1853-1873.
- [38] Jaušovec, N. (2011). *Metacognition*[A]. *Encyclopedia of Creativity*[M/OL]. 2nd ed. Elsevier: 107-112. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123750389001461>.
- [39] Kapur, M.(2008). Productive failure[J]. *Cognition and Instruction*, 26(3): 379-425.
- [40] Kapur, M.(2014). Productive failure in learning math[J]. *Cognitive Science*, 38(5): 1008-1022.
- [41] Kapur, M., & Bielaczyc, K.(2012). Designing for productive failure[J]. *Journal of the Learning Sciences*, 21(1): 45-83.
- [42] Keith, N., & Frese, M.(2005). Self-regulation in error management training: Emotion control and metacognition as mediators of performance effects[J]. *Journal of Applied Psychology*, 90(4): 677-691.
- [43] Kendeou, P., Walsh, E. K., Smith, E. R., & O'Brien, E. J.(2014). Knowledge revision processes in refutation texts[J]. *Discourse Processes*, 51(5-6): 374-397.
- [44] Koedinger, K. R., Corbett, A. T., & Perfetti, C.(2012). The Knowledge-Learning-Instruction framework: Bridging the science-practice chasm to enhance robust student learning[J]. *Cognitive Science*, 36(5): 757-798.
- [45] Kolić-Vehovec, S.(2002). Effects of self-monitoring training on reading accuracy and fluency of poor readers[J]. *European Journal of Psychology of Education*, 17(2): 129-138.
- [46] 小湊彩子(2018). 「教訓帰納」を活用したりメデイアル英語教育[J]. *リメデイアル教育研究*, 12: 89-97.
- [47] Kornell, N., Hays, M. J., & Bjork, R. A. (2009). Unsuccessful retrieval attempts enhance subsequent learning[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4): 989-998.
- [48] Kuhn, D.(1992). Thinking as argument[J]. *Harvard Educational Review*, 62(2): 155-179.
- [49] Kuhn, D.(2022). Metacognition matters in many ways[J]. *Educational Psychologist*, 57(2): 73-86.
- [50] Leaper, C. (2011). More similarities than differences in contemporary theories of social development?: A plea for theory bridging[A]. In Benson, J. B. (ed.), *Advances in Child Development and Behavior* [M/OL]. JAI: 337-378. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864918000098>.
- [51] Li, S.(2010). The effectiveness of corrective feedback in SLA: A meta-analysis[J]. *Language Learning*, 60(2): 309-365.
- [52] Linn, M. C., Shear, L., Bell, P., & Slotta, J. D.(1999). Organizing principals for science education partnerships: Case studies of students' learning about "rats in space" and "deformed frogs." [J]. *Educational Technology Research and Development*, 47(2): 61-84.
- [53] Linn, M. C., & Songer, N. B.(1991). Cognitive and conceptual change in adolescence[J]. *American Journal of Education*, 99(4): 379-417.
- [54] Liu, M., & Uesaka, Y. (2022). Factors that influence deep/shallow lecture notetaking: Japanese and Chinese students' strategies in math class[J/OL]. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*[2023-04-02]. <https://doi.org/10.1037/mac0000075>.
- [55] Loibl, K., & Leuders, T.(2019). How to make failure productive: Fostering learning from errors through elaboration prompts[J]. *Learning and Instruction*, 62: 1-10.
- [56] 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.
- [57] Loibl, K., & Rummel, N.(2014). Knowing what you don't know makes failure productive[J]. *Learning and Instruction*, 34: 74-85.
- [58] Loibl, K., Tillema, M., Rummel, N., & Van Gog, T.(2020). The effect of contrasting cases during problem solving prior to and after instruction[J]. *Instructional Science*, 48(2): 115-136.
- [59] Mayer, R. E.(1996). Learning strategies for making sense out of expository text: The SOI model for guiding three cognitive processes in knowledge construction[J]. *Educational Psychology Review*, 8(4): 357-371.
- [60] Mera, Y., Rodríguez, G., & Marin-García, E.(2022). Unraveling the benefits of experiencing errors during learning: Definition, moderating factors, and explanatory theories[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29: 753-765.
- [61] Metcalfe, J.(2017). Learning from errors[J]. *Annual Review of Psychology*, 68(1): 465-489.
- [62] Miller, A. L., Wissman, K. T., & Peterson, D. J.(2022). The

continued influence effect: Examining how age, retraction, and delay impact inferential reasoning[J]. *Applied Cognitive Psychology*, 36(3): 708-723.

[63] Moreno, R.(2004). Decreasing cognitive load for novice students: Effects of explanatory versus corrective feedback in discovery-based multimedia[J]. *Instructional Science*, 32(1/2): 99-113.

[64] Nawaz, S., Srivastava, N., Yu, J. H., Khan, A. A., Kennedy, G., Bailey, J., et al.(2022). How difficult is the task for you? modelling and analysis of students' task difficulty sequences in a simulation-based POE environment[J]. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 32(2): 233-262.

[65] Nückles, M., Roelle, J., Glogger-Frey, I., Waldeyer, J., & Renkl, A.(2020). The self-regulation-view in writing-to-learn: Using journal writing to optimize cognitive load in self-regulated learning[J]. *Educational Psychology Review*, 32(4): 1089-1126.

[66] Ohlsson, S.(1996). Learning from performance errors[J]. *Psychological Review*, 103(2): 241-262.

[67] Oyama, Y., Manalo, E., & Nakatani, Y.(2018). The Hemingway effect: How failing to finish a task can have a positive effect on motivation[J]. *Thinking Skills and Creativity*, 30: 7-18.

[68] Panadero, E.(2017). A review of self-regulated learning: Six models and four directions for research[J]. *Frontiers in Psychology*, 8: 422.

[69] Perkinson, H. J.(1979). Learning from our mistakes[J]. *ETC: A Review of General Semantics*, 36(1): 37-57.

[70] Pintrich, P., Marx, R., & Boyle, R.(1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change[J]. *Review of Educational Research*, 63: 167-199.

[71] Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A.(1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change[J]. *Science Education*, 66(2): 211-227.

[72] Potts, R., Davies, G., & Shanks, D. R. (2019). The benefit of generating errors during learning: What is the locus of the effect?[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45: 1023-1041.

[73] Pyc, M. A., & Rawson, K. A.(2010). Why testing improves memory: Mediator effectiveness hypothesis[J]. *Science*, 330(6002): 335.

[74] Rach, S., Ufer, S., & Heinze, A.(2013). Learning from errors: Effects of teachers training on students' attitudes towards and their individual use of errors[J]. *PNA*, 8(1): 21-30.

[75] Renkl, A.(2014). Toward an instructionally oriented theory of example-based learning[J]. *Cognitive Science*, 38(1): 1-37.

[76] Rowland, C. A.(2014). The effect of testing versus restudy on retention: A meta-analytic review of the testing effect[J]. *Psychological Bulletin*, 140(6): 1432-1463.

[77] Safadi, R.(2018). Knowledge-integration processes and learning outcomes associated with a self-diagnosis activity: The case of 5th-graders studying simple fractions[J]. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16(5): 929-948.

[78] Safadi, R.(2022). Supporting student learning from diagnosing erroneous examples when contrasting them with worked examples in the physics classroom[J]. *International Journal of Science Education*, 44(2): 245-270.

[79] Safadi, R., & Saadi, S.(2021). Learning from self-diagnosis activities when contrasting students' own solutions with worked examples: The case of 10th graders studying geometric optics[J]. *Research in Science Education*, 51(2): 523-546.

[80] Salomon, G., & Globerson, T.(1987). Skill may not be enough: The role of mindfulness in learning and transfer[J]. *International Journal of Educational Research*, 11(6): 623-637.

[81] Sato, M., & Lyster, R.(2012). Peer interaction and corrective feedback for accuracy and fluency development: Monitoring, practice, and proceduralization[J]. *Studies in Second Language Acquisition*, 34(4): 591-626.

[82] Schenck, A. (2021). Defining grammatical difficulty to make better choices about corrective feedback: A meta-analysis of Persian EFL learners[J]. *SAGE Open*, 11(3): 21582440211047560.

[83] Schroeder, N. L., & Kucera, A. C.(2022). Refutation text facilitates learning: A meta-analysis of between-subjects experiments[J]. *Educational Psychology Review*, 34(2): 957-987.

[84] Schwartz, D. L., Chase, C. C., Oppezzo, M. A., & Chin, D. B.(2011). Practicing versus inventing with contrasting cases: The effects of telling first on learning and transfer[J]. *Journal of Educational Psychology*, 103(4): 759-775.

[85] Seabrooke, T., Hollins, T. J., Kent, C., Wills, A. J., & Mitchell, C. J.(2019). Learning from failure: Errorful generation improves memory for items, not associations[J]. *Journal of Memory and Language*, 104: 70-82.

[86] Senders, J. W., & Moray, N. P. (2020). *Human Error: Cause, Prediction, and Reduction*[M]. Boca Raton: CRC Press: 20.

[87] Sheen, Y.(2010). Differential effects of oral and written corrective feedback in the ESL classroom[J]. *Studies in Second Language Acquisition*, 32(2): 203-234.

[88] 盛群力(2023). 核心素养落地呼唤“新课型”——兼论教策略越教越聪明[J]. *中国电化教育*, (2): 29-39.

[89] Shintani, N., & Ellis, R.(2013). The comparative effect of direct written corrective feedback and metalinguistic explanation on learners' explicit and implicit knowledge of the English indefinite article[J]. *Journal of Second Language Writing*, 22(3): 286-306.

[90] Silva, C., Peixoto, F., & Salvador, L.(2021). "To give someone a fish or teach them how to fish?": Effects of a self-reflection tool on orthographic performance in Portuguese children[J]. *Reading and Writing*, 34(10): 2481-2503.

[91] Sinha, T., & Kapur, M.(2021). When problem solving followed by instruction works: evidence for productive failure[J]. *Review of Educational Research*, 91(5): 761-798.

[92] Smith, T. A., & Kimball, D. R. (2010). Learning from feedback: Spacing and the delay-retention effect[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(1): 80-95.

- [93] Soncini, A., Visintin, E. P., Matteucci, M. C., Tomasetto, C., & Butera, F.(2022). Positive error climate promotes learning outcomes through students' adaptive reactions towards errors[J]. *Learning and Instruction*, 80: 101627.
- [94] Steuer, G., & Dresel, M.(2015). A constructive error climate as an element of effective learning environments[J]. *Psychological Test and Assessment Modeling*, 57(2): 262-275.
- [95] Steuer, G., Rosentritt-Brunn, G., & Dresel, M.(2013). Dealing with errors in mathematics classrooms: Structure and relevance of perceived error climate[J]. *Contemporary Educational Psychology*, 38(3): 196-210.
- [96] Steuer, G., Tulis, M., & Dresel, M.(2022). Is dealing with errors in the classroom specific for school subjects? A study of the error climate in mathematics, German, and English[J]. *European Journal of Psychology of Education*, 37: 355-373.
- [97] Swanson, H., & Trninic, D.(2021). Stepping out of rhythm: An embodied artifact for noticing rate of change[J]. *Educational Technology Research and Development*, 69(4): 2037-2057.
- [98] Thomas, K. E.(2018). Comparing explicit exemplar-based and rule-based corrective feedback: Introducing analogy-based corrective feedback[J]. *The Modern Language Journal*, 102(2): 371-391.
- [99] Tulis, M.(2013). Error management behavior in classrooms: Teachers' responses to student mistakes[J]. *Teaching and Teacher Education*, 33: 56-68.
- [100] Tulis, M., & Ainley, M.(2011). Interest, enjoyment and pride after failure experiences? Predictors of students' state-emotions after success and failure during learning in mathematics[J]. *Educational Psychology*, 31(7): 779-807.
- [101] Tulis, M., Steuer, G., & Dresel, M.(2016). Learning from errors: A model of individual processes[J]. *Frontline Learning Research*, 4(4): 12-26.
- [102] Tulis, M., Steuer, G., & Dresel, M.(2018). Positive beliefs about errors as an important element of adaptive individual dealing with errors during academic learning[J]. *Educational Psychology*, 38(2): 139-158.
- [103] Uesaka, Y., Fukaya, T., & Ichikawa, S. (2017). Strategies for achieving deep understanding and improving learning skills: New approaches to instruction and lesson study in Japanese schools[A]. In Yip, M. C., (ed.), *Cognition, Metacognition and Academic Performance: An East Asian Perspective*[M]. Routledge, 2017: 101-121.
- [104] 植阪友理, 内田奈緒, 佐宗駿, 柴里実, 太田絵梨子, 劉夢思等(2022). 自学自習を支援する「オンライン学習法講座」の開発と高校での実践 [J]. *教育心理学研究*, 70 (4): 404-418.
- [105] Van der Stel, M. (2011). Development of metacognitive skills in young adolescents: a bumpy ride to the high road[D]. Leiden University: 124.
- [106] Van Harsel, M., Hoogerheide, V., Verhoeijen, P., & Van Gog, T.(2019). Effects of different sequences of examples and problems on motivation and learning[J]. *Contemporary Educational Psychology*, 58: 260-275.
- [107] Van Peppen, L. M., Verhoeijen, P. P. J. L., Heijltjes, A. E. G., Janssen, E. M., & Van Gog, T.(2021). Enhancing students' critical thinking skills: Is comparing correct and erroneous examples beneficial?[J]. *Instructional Science*, 49(6): 747-777.
- [108] VanLehn, K.(1987). Learning one subprocedure per lesson[J]. *Artificial Intelligence*, 31(1): 1-40.
- [109] VanLehn, K. (1988). Towards a theory of impasse-driven learning[A]. In Mandl, H., & Lesgold, A., (eds.), *Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems*[M]. Springer New York, NY: 19-41.
- [110] VanLehn, K.(1999). Rule-learning events in the acquisition of a complex skill: An evaluation of cascade[J]. *Journal of the Learning Sciences*, 8(1): 71-125.
- [111] Von Kotzebue, L., Förtsch, C., Förtsch, S., & Neuhaus, B. J.(2022). Dealing with student errors in whole-class discussions of biology lessons at German secondary schools[J]. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 20(3): 459-480.
- [112] Vosoughi, S., Roy, D., & Aral, S.(2018). The spread of true and false news online[J]. *Science*, 359(6380): 1146-1151.
- [113] Wong, S. S. H.(2023). Deliberate erring improves far transfer of learning more than errorless elaboration and spotting and correcting others' errors[J]. *Educational Psychology Review*, 35(1): 16.
- [114] Wong, S. S. H., & Lim, S. W. H.(2022a). Deliberate errors promote meaningful learning[J]. *Journal of Educational Psychology*, 114(8): 1817-1831.
- [115] Wong, S. S. H., & Lim, S. W. H.(2022b). The derring effect: Deliberate errors enhance learning[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(1): 25-40.
- [116] Yang, L.(2018). Effects of three tasks on interpreting fluency[J]. *The Interpreter and Translator Trainer*, 12(4): 423-443.
- [117] Yang, C., Potts, R., & Shanks, D. R. (2017). Metacognitive unawareness of the errorful generation benefit and its effects on self-regulated learning[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43: 1073-1092.
- [118] Zamora, Á., Suárez, J. M., & Ardura, D.(2018). Error detection and self-assessment as mechanisms to promote self-regulation of learning among secondary education students[J]. *The Journal of Educational Research*, 111(2): 175-185.
- [119] Zapf, D., & Reason, J. T.(1994). Introduction: human errors and error handling[J]. *Applied Psychology*, 43(4): 427-432.
- [120] 张恩铭(2022). 助力教师培育专家型学习者: 日本“教后促思”与“三角度热议”模式的经验与启示 [J]. *外国教育研究*, 49 (6): 34-52.
- [121] Zhang, E. (2022). What is the better feedback for secondary school students to learn from self-made errors?[C]. Program of the JSET Autumn Conference 2022 (41st), Japan Society for Educational Technology, Kawasaki, Kanagawa, Japan: 291-292.
- [122] Zhang, Q., & Fiorella, L.(2023). An integrated model of learning from errors[J]. *Educational Psychologist*, 58(1): 18-34.
- [123] Zhao, B.(2011). Learning from errors: The role of context, emotion, and personality[J]. *Journal of Organizational Behavior*, 32(3):



435-463.

[124] Ziegler, E., Trninić, D., & Kapur, M. (2021). Micro productive failure and the acquisition of algebraic procedural knowledge[J]. *Instructional Science*, 49(3): 313-336.

[125] Zimmerman, B. J. (1998). Developing self-fulfilling cycles of

academic regulation: An analysis of exemplary instructional models[A]. In Schunk, D. H., & Zimmerman, B. J. (eds.), *Self-Regulated Learning: From Teaching to Self-Reflective Practice*[M]. New York, NY: Guilford Publications: 1-19.

(编辑: 赵晓丽)

## Learning from Errors: Theoretical Research and Design of Instructional Conditions

ZHANG Enming

(College of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** *Recently, learning from errors has gained significant attention worldwide in educational psychology. Both theoretical and practical issues are emerging regarding how to design instructional conditions regarding learning from errors to facilitate deep learning. By examining four research contexts, including simulation of the human thinking process by computational modeling, retrieval process of memorization, conceptual change, and meta-cognition and self-regulation, this study identified learning from errors as a higher-order learning and self-regulated learning activity and introduced the error-learning and error-reaction models as supportive reference. The study also analyzed and compared various related elements in research fields, including generating effect, problem-solving prior to instruction, example-based learning, conceptual change, self-addressing errors, and language learning. Results indicated error source and the timing, method, form, process, and outcome of learning from errors as crucial instructional conditions to moderate the effects of existing instructional modes. These findings can provide a guide for future research on learning from errors. Practically, the discussion on integrating the research findings into existing instructional designs offers implications for improving classroom practices that leverage errors more effectively.*

**Key words:** *learning from errors; educational psychology; instructional design; higher-order learning; self-regulated learning*