

比例推理的过度使用及其认知机制： 一项发展性的负启动研究

江荣焕¹ 李晓东²

(¹北京师范大学心理学院, 北京 100875) (²深圳大学心理与社会学院, 深圳 518060)

摘要 从抑制控制模型出发, 采用负启动范式探究过度使用比例推理的认知机制。研究包括 3 个实验, 以小学生、中学生和大学生为被试, 分别考察了抑制控制在解决缺值应用题、图片推理任务中的作用, 以及数字比(整数比、非整数比)是否对抑制控制过程有影响。结果发现: 小学生、中学生和大学生在两类实验任务中均出现了负启动效应, 但负启动量不存在年级差异; 在图片推理任务中, 不同数字比类型下的负启动量具有显著差异。研究结果支持了抑制控制模型的观点, 即成功解决问题不仅需要掌握问题的内在逻辑, 更需要对不恰当策略进行抑制; 在解决问题的过程中, 无论是儿童、青少年还是成人都需要抑制控制的参与, 三者在抑制控制效率上没有差异; 数字比类型对抑制过程有影响, 但仅限于图片推理问题。

关键词 比例推理; 抑制控制; 负启动; 缺值应用题; 数学认知

分类号 B842

1 引言

比例关系在中小学的数学学习中扮演了重要的角色, 从评估量级大小到比率(ratio)概念的学习, 从交叉相乘法到基础线性代数的计算, 都潜藏着比与比例的关系。在所有的高阶数学知识中, 比例性(proportionality)是最为基础的一种, 同时它也是所有基础数学知识中最高级的一种(Lesh, Post, & Behr, 1988)。可以说, 比例关系和比例推理的掌握在数学学习过程中具有关键作用, 扮演了分水岭的角色。

比例推理虽然重要, 但是有研究指出, 当学生熟练地掌握了比例推理之后, 他们容易“无时无刻”地使用比例推理, 哪怕他们遇到的数学问题并不具备比例性质。例如, 对于“小黄和小李在操场上跑步, 他们跑得一样快但是小黄比小李先开始跑, 当小李跑了 3 圈时, 小黄跑了 6 圈, 那么当小李跑了 12 圈时, 小黄跑了多少圈?”这样的数学应用题, 本应该使用加法来解答, 即 $12 + (6 - 3) = 15$ 圈, 但是许多学生却使用了比例方法来解答, 即 $6 \times (12 / 3) =$

24 圈(De Bock, van Dooren, Janssens, & Verschaffel, 2002; van Dooren, De Bock, Vleugels, & Verschaffel, 2010)。这种现象被称为比例推理的过度使用(the overuse of proportional reasoning)。

一些研究者认为这一现象的出现与问题的呈现形式有关。比例问题多以缺值形式出现(missing-value format, 即问题中给出了 3 个已知数量而第四个数量未知), 使得学生在学习过程中将这种特殊的问题形式与比例方法联系起来。当加法问题也以缺值形式呈现时, 学生容易受到缺值结构的误导, 从而错误地采用了比例方法(Fernández, Llinares, van Dooren, De Bock, & Verschaffel, 2012)。也有学者认为, 日常生活中存在大量的比例关系, 这种关系具有直觉性(intuitiveness)和简单性(simplicity), 导致学生容易落入“比例陷阱”, 把许多数量关系当成比例关系(De Bock, van Dooren, Janssens, & Verschaffel, 2007)。然而, 上述的解释仅仅提及问题的外在特征或环境因素, 没有揭示过度使用比例推理现象的认知机制。Gillard, van Dooren, Schaeken 和 Verschaffel (2009)基于双加工理论提出过度使用

比例推理的现象可能是启发式加工的结果。启发式加工是基于直觉的,其特点是快速、基于整体或全局的,无需努力。Gillard 等人(2009)通过给被试施加时间压力或增加其工作记忆负荷来唤起启发式加工,结果发现,被试在该条件下解答缺值型加法问题时的确犯了更多的比例错误,出现了更严重的过度使用比例推理的现象。这说明比例推理可能是一种启发式的加工过程(Heuristic-Based Process),而正确解决缺值型加法问题则需要分析式加工。但是,由于该研究仅采用了正确率作为分析指标,因此只能回答被试在解决加法问题时是否需要分析式加工,却无法回答这种加工过程是如何进行的。此外,有研究者指出二分法的双加工系统无法充分地涵盖某些推理研究中的认知过程(Osman & Stavy, 2006)。依据 Osman 和 Stavy 的观点,基于技巧的(skill-based)推理过程(如比例推理)往往同时具有启发式加工和分析式加工的特点,个体最初在获得推理技能时是分析式的,通过一定的练习之后,这种分析式加工会转变成一种自动化过程(或启发式),我们很难断定基于技巧的推理过程是单纯的分析式或启发式。双加工理论认为当启发式加工导致的结果是错误的时候,需要分析式加工才能正确解决问题,但是它并没有指出分析式加工是如何战胜启发式加工的、以及启发式加工与分析式加工的冲突是如何化解的。

新皮亚杰学派提出的抑制控制模型则能够弥补上述研究的不足。其基本思想是将个体的认知发展视为一个连续的叠波模型——在任何年龄、任一时间点,个体在解决问题时,头脑里都会呈现多种思维方式或策略,它们之间彼此竞争。认知发展是复杂程度不同的解决策略为了在大脑中获得表达而彼此竞争的结果。认知发展不仅是获得复杂的概念,而且必须能够抑制先前获得的一些经过反复学习和使用的知识与技能。因此,即使个体掌握了正确解决某类问题的知识或技能,但是如果无法抑制其他不恰当的策略,问题解决依然会失败,而抑制不恰当策略的认知过程才是正确解决问题的关键(Houdé, 2007; Houdé et al., 2011; Houdé & Borst, 2014; 付馨晨, 李晓东, 2017)。

研究者采用负启动范式来检验被试在解决数学问题时是否需要抑制控制的参与(Houdé & Borst, 2014; Lubin, Vidal, Lanoë, Houdé, & Borst, 2013; Meert, Grégoire, & Noël, 2010; Stavy & Babai, 2010)。该范式的逻辑是:如果一个策略在先前的

任务中被抑制了,那么在紧接着的任务中如果需要激活这一策略,其加工过程将会受到阻碍,表现为反应时的延长,即出现负启动效应。例如, Lubin 等人(2013)设计了三类比较问题:不一致问题(需要抑制“多即加,少即减”的误导性策略)、一致问题(需要使用“多即加,少即减”的策略)和中立问题(仅需要简单比较)。实验分为测试条件(先完成不一致题目再完成一致题目)和中立条件(先完成中立题目再完成一致题目)。结果发现,相比中立条件,被试在测试条件中对一致题目的反应时更长,出现了负启动效应。Meert 等人(2010)的研究也通过负启动范式发现学生在比较两个分数的大小(如比较 $3/7$ 和 $3/8$)时需要抑制“直接比较自然数(即比较 7 和 8)”这一策略。这些研究都表明抑制控制模型和负启动范式可以很好地对数学问题解决中的一些非理性偏差进行解释和预测。依据抑制控制模型和以往的研究结果,我们认为过度使用比例推理现象可能是由于学生无法抑制比例策略造成的。从查阅的国内外文献来看,目前尚未见到从抑制控制的视角对过度使用比例推理现象进行解释的文章发表。因此,本研究的第一个目的是采用负启动范式探讨学生过度使用比例推理的认知机制,重点考察学生在解决缺值型加法问题时的抑制控制过程。

以抑制控制模型为基础的研究还发现,即使到了成人阶段,个体在完成实验任务时仍然会出现负启动效应,但是相比儿童和青少年,这一效应更小,体现了抑制控制效率(inhibitory control efficiency)的发展性(Borst, Poirel, Pineau, Cassotti, & Houdé, 2013; Zelazo & Müller, 2010)。也有研究表明,随着年龄的增长,过度使用比例推理的倾向有所下降(Jiang, Li, Fernández, & Fu, in press; 李晓东, 江荣焕, 钱玉娟, 2014),这是否是由于抑制控制效率随着年龄的增长而有所提高所导致呢?因此,本研究的第二个目的是探讨学生在解决非比例问题时的抑制控制效率是否会随着年龄的增长而改变。此外,以往的研究大多采用缺值应用题作为实验材料,但是有研究指出缺值结构本身就会诱发学生使用比例推理(Fernández et al., 2012; Tjoe & de la Torre, 2014; 李晓东等, 2014)。因此除了采用缺值应用题作为实验材料之外,本研究还设计了新的实验材料,即以图片呈现的方式来表达共变关系,使得学生不再依赖于缺值应用题的文字和数字进行推理判断,以此来探讨学生在解决其他形式的加法问题时是否同样需要抑制控制的参与。

最后,一些研究还发现学生过度使用比例推理不仅与问题的缺值形式有关,还与问题中的数字比有关。van Dooren, De Bock, Evers 和 Verschaffel (2009)的研究发现,4到6年级的学生在解答缺值应用题时所使用的策略会受到问题中所呈现数字的影响,例如,对于“Peter 和 Tom 正在往卡车里搬箱子,他们同时开始但是 Tom 搬得更快。当 Peter 搬了 40 个时, Tom 搬了 100 个。那么,当 Peter 搬了 60 个时, Tom 搬了几个?”这样的题目,需要使用比例策略才能正确解答,然而由于题目中出现的数字之比 60:40、100:40 均不是整数,因此学生在解答题目时更少使用比例策略,错误率也更高。相反,如果在加法应用题中的数字比不是整数,各个年龄段的学生的正确率则会提高,过度使用比例策略的百分比也更低。其他研究也发现当数字比为整数时,被试更容易过度使用比例推理,而题目中的数字比不为整数时,这一倾向也随之下降(Fernández et al., 2009; Fernández, Llinares, van Dooren, De Bock, & Verschaffel, 2011; 李晓东等, 2014)。那么,相比整数比的情况,人们在非整数比条件下对比例推理的抑制是否更加容易呢?因此,本研究的最后一个目的则是探讨数学问题中的数字比类型(整数比、非整数比)对抑制控制过程的影响。

2 实验 1

2.1 实验目的

采用负启动范式考察被试在解决缺值形式的加法问题时是否需要抑制控制的参与。本研究假设被试要正确解决加法问题需要抑制比例策略。首先在启动作业阶段呈现加法问题,然后在探测作业阶段呈现比例问题。实验的逻辑是如果被试在启动阶段解决加法问题时需要抑制比例策略,那么在探测阶段解决比例问题时,被试就需要付出额外的“代价”来激活比例策略,从而出现负启动效应,表现为探测作业反应时的延长或错误率的增加。

2.2 研究方法

2.2.1 被试

被试来自深圳市福田区实验学校(中、小学)、深圳市海滨实验小学、深圳市龙岗区石芽岭学校(中、小学)和深圳大学。其中 6 年级学生 44 人(男 18 人,女 26 人,平均年龄 12.03 ± 0.5 岁),8 年级学生 38 人(男 18 人,女 20 人,平均年龄 14.13 ± 0.6 岁),大学生 33 人(男 17 人,女 16 人,平均年龄 21.47 ± 2.4 岁)。在进行实验之前先通过班主任或科任老师了

解学生的信息,排除智力有缺陷或者存在阅读障碍的被试。所有被试的视力或矫正视力正常并且以前未参加过类似的实验。被试均已学习过解决问题所需要的比例知识和加法知识,经过讲解后能够理解题目中的意义。

2.2.2 实验材料

本研究设计了 3 种不同的题目:比例问题、加法问题和中立问题。加法和比例问题具有缺值形式,问题中的数字关系为 $a/b = c/x$ 或 $a-b = c-x$, 已知 a 、 b 、 c 三个数值,求 x 。每道题目分成 4 句独立的句子同时呈现在计算机屏幕上,这些句子分别给被试提供了以下信息:1) 主人公以及他们所进行的活动(如跑步);2) 主人公之间的关系是属于比例关系、加法关系还是一致关系;3) 缺值结构中 a 、 b 、 c 的数值;4) 问题的答案 x 的值。

被试的任务是依据问题的条件进行计算,并判断划横线的最后一句话是否正确(即判断 x 的正误)。对于比例题和加法题,有一半的题目给出的是比例答案(在比例题中为正确),而另一半题目给出的是加法答案(在加法题中为正确)。为了方便被试进行心算,所有的数值之间的比均为小于或等于 4 的整数,所有的减法均不涉及借位运算。

对于中立项目,问题中的主人公所进行的活动(如跑步)、问题的形式(同样具有缺值结构)以及问题在电脑屏幕上呈现的知觉特征(句子的长短、文字的大小等)都与比例题和加法题有高度的一致性,但是学生在解决中立题目时仅需要简单的比较而不需要进行加减乘除等运算(如比较 7 与 8 是否相等)。这一设置保证了被试在完成中立题目时所接受的视觉刺激和文字加工过程与比例题目和加法题目高度一致,同时也不需要激活或者抑制上述的两种策略。3 种题目的具体例子见表 1。

2.2.3 实验设计

采用 2(实验条件:控制 vs.测试) \times 3(年级:6 年级、8 年级、成人)的混合实验设计,其中,实验条件为被试内变量,在控制条件下,被试先完成中立题目,再完成比例题目,在测试条件下,被试先完成加法题目,再完成比例题目。因变量为被试在两种条件下对探测项目(比例题目)的反应时和错误率。

2.2.4 实验流程

采用团体实验的方式,被试都统一在实验室(中小学生在多媒体教室)中完成测试。实验开始前,向被试呈现指导语:“在我们的实验中,你需要

表 1 比例题目、加法题目以及中立题目示例

题目类型	应用题
比例题目	小黄和小李在操场上跑步 他们同时开始跑,但是小黄跑得比小李快 当小李跑了 3 圈时,小黄跑了 6 圈, 那么当小李跑了 12 圈时, <u>小黄跑了 24(15)圈?</u>
加法题目	小黄和小李在操场上跑步 小黄比小李先开始跑,但是他们跑得一样快 当小李跑了 3 圈时,小黄跑了 6 圈 那么当小李跑了 12 圈时, <u>小黄跑了 15(24)圈?</u>
中立题目	小黄和小李在操场上跑步 他们同时开始跑,并且两人跑得一样快 当小李跑了 3 圈时,小黄跑了 3 圈 那么当小李跑了 7 圈时, <u>小黄跑了 7(8)圈?</u>

注:括号中为错误答案

解答一些简单的小学数学应用题。实验开始后,屏幕上会呈现一道数学应用题,你需要判断题目中最后一句话(已用下划线标出)是否正确。如果正确,请按‘J’键,如果错误,则按‘F’键。如果你明白上面的要求,请按等待实验员指示。”随后告知被试按空格键进入练习。之后,被试进行 6 个试次的练习,分别包括 2 道比例题(答案正误各一道,下同)、2 道加法题和 2 道中立题。练习过程中屏幕上会自动给出正误反馈,被试有返回练习一次的机会。练习中的题目随机呈现,并且这些题目不会出现在正式实验中。

练习结束后,被试完成 16 个试次,其中两种实验条件下各有 8 个试次。在控制条件中,被试先完成中立问题,再完成比例问题;在测试条件中,被试先完成加法问题,再完成比例问题。为了平衡实

验条件间的顺序效应及可能出现的习惯化反应,16 个试次的呈现顺序采用伪随机设计,同种条件的试次不会连续出现 3 次或以上,而测试条件与控制条件中的题目则完全随机呈现。需要强调的是,为了使每种条件中探测项目的比例题的难度保持一致,两种实验条件中的比例题所用到的 8 组数字是完全一致的,而两种条件中应用题的主人公以及所进行的活动则不一样。

在每个试次中,屏幕上会先呈现一个红色的“+”号注视点,持续 500 ms,随后出现启动项目(中立题或加法题),持续 18000 ms(大学生为 15000 ms),之后空屏 500 ms,出现探测项目(比例题),持续 18000 ms(大学生为 15000 ms)。随后呈现一张中性图片作为掩蔽刺激,持续 1500 ms。刺激的呈现流程见图 1。实验程序用 E-prime 2.0 编写。

2.3 实验结果

依据负启动的实验逻辑,负启动效应只能在被试正确解决加法问题的情况下出现,因此将加法问题的正确率低于 50%(含 50%)的被试剔除,同时剔除各类题目的平均反应时 ± 3 个标准差之外的数据,各年级有效被试分别为 25 人(6 年级)、26 人(8 年级)、26 人(大学生)。被试在探测项目的平均错误率和反应时见表 2。

以探测项目错误率和反应时为因变量,进行 2(实验条件:测试 vs.控制) \times 3(年级:6 年级、8 年级、大学生)的重复测量方差分析。由于本研究的目的是验证负启动效应及负启动效应的年级差异,而其他

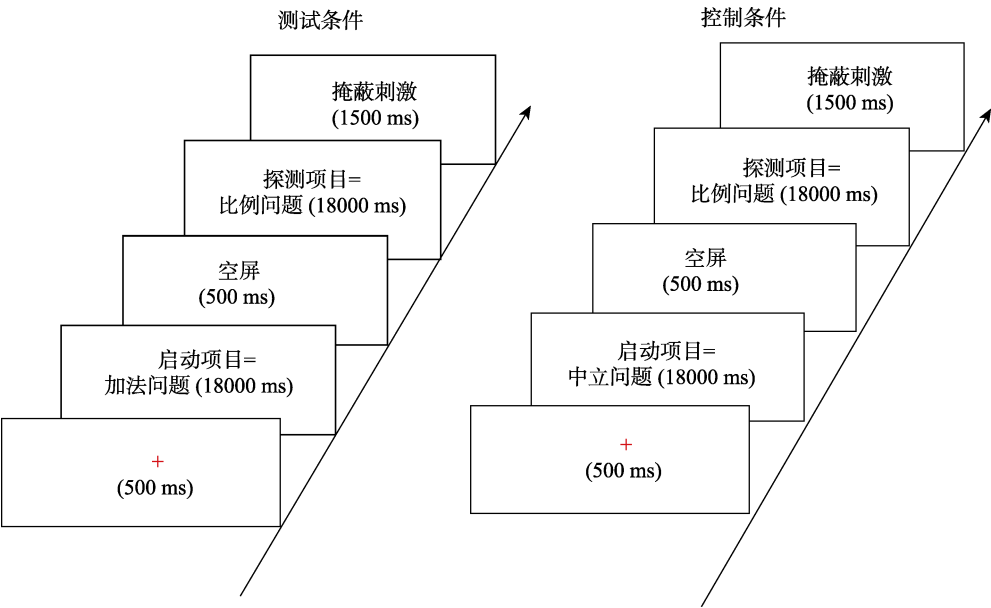


图 1 实验 1 刺激呈现流程图

表2 被试在实验1中探测项目上的错误率(%)和反应时(ms) ($M \pm SD$)

年级	错误率		反应时		负启动量
	控制条件	测试条件	控制条件	测试条件	
6 年级($n = 25$)	9.8 ± 10.7	10.3 ± 12.7	6748.9 ± 1653.4	7684.6 ± 1967.9	935.7 ± 905.9
8 年级($n = 26$)	12.8 ± 12.4	11.8 ± 10.8	7464.9 ± 2514.8	8167.3 ± 2584.1	702.4 ± 1230.7
大学生($n = 26$)	12.3 ± 13.1	13.7 ± 11.8	6300.2 ± 2334.2	6746.0 ± 2267.0	445.9 ± 1085.6

注：负启动量 = 测试条件中探测项目的反应时 - 控制条件中探测项目的反应时

的主效应和交互效应与研究目的无关，为了简化实验结果，本研究仅呈现实验条件的主效应及与实验条件相关的交互效应。

对探测项目的错误率进行方差分析，发现实验条件的主效应不显著， $F(1, 74) = 0.057, p > 0.1$ 。实验条件与年级的交互效应不显著， $F(2, 74) = 0.354, p > 0.1$ 。说明实验条件及年级对学生解题成绩没有显著影响。

对探测项目的反应时进行方差分析，发现实验条件的主效应显著， $F(1, 74) = 31.586, p < 0.01, \eta^2 = 0.299$ ，被试解答测试条件中的比例题所需要的时间(7532.6 ± 2338.1 ms)显著长于其解答控制条件中的比例题所需要的时间(6838.0 ± 2229.8 ms)，出现了负启动效应。实验条件与年级的交互效应不显著， $F(2, 74) = 1.302, p > 0.1$ 。这说明大中小学生在解决加法问题时都需要抑制控制过程的参与。

虽然被试的负启动量随着年级的增加而递减(6 年级： 935.7 ± 905.9 ，8 年级： 702.4 ± 1230.7 ；大学生： 445.9 ± 1085.6)，但是以年级为自变量的单因素方差分析结果显示，年级的主效应不显著， $F(2, 74) = 1.302, p > 0.1$ 。说明各年级被试的抑制控制效率没有差别。

2.4 讨论

本研究发现，被试在测试条件下解决比例问题的反应时显著长于控制条件，出现了负启动效应，说明被试在解决启动阶段的加法问题时的确需要抑制比例策略，实验结果支持抑制控制模型。本研究还发现，大中小学生在解决缺值形式的加法问题时均需要抑制控制的参与，这说明抑制控制能力在人的一生中都持续发挥作用，成人也需要抑制直觉或启发式偏差(Houdé, 2007; Houdé & Borst, 2014)。从负启动量来看，大中小学生之间没有显著差异，也就是说，在解决加法问题时，个体未表现出随着年级增长，抑制控制效率提高的趋势。导致这种结果的原因可能是实验材料以文字形式出现，每个题目由长达 4 行的文字构成，被试需要对题目阅读、记忆和问题表征，认知负荷较重，导致解题能力较

差的个体无法进入数据分析，因而体现不出年级差异。从删除数据的情况看，6 年级达到了 43%，进入数据分析的儿童可能是数学成绩较好的那一类，他们的解题水平可能与大中学生较为接近，从而导致年级差异不明显。在本研究中，大中小学生在解决比例问题的错误率上没有显著差异，也可以证明这一点。

为了减低文字应用题给被试带来的认知负荷，同时也为了考察被试在解决非缺值型的加法问题时是否也需要抑制控制的参与，本研究进行了实验 2。

3 实验 2

3.1 实验目的

采用负启动范式考察被试在图片推理任务中解决加法问题时是否需要抑制控制的参与。本研究假设被试在解决图片推理任务中的加法问题时需要抑制比例策略。与实验 1 的逻辑一样，如果被试在启动阶段解决加法问题时需要抑制比例策略，那么在探测阶段解决比例问题时，被试就需要付出额外的“代价”来激活比例策略，从而出现负启动效应，表现为探测作业反应时的延长或错误率的增加。

3.2 研究方法

3.2.1 被试

被试来自深圳市福田区实验学校(中、小学)、深圳市海滨实验小学、深圳市龙岗区石芽岭学校(中、小学)和深圳大学。其中 6 年级学生 42 人(男 19 人，女 23 人，平均年龄 12.02 ± 0.4 岁)，8 年级学生 39 人(男 17 人，女 22 人，平均年龄 14.18 ± 0.5 岁)，大学生 43 人(男 23 人，女 20 人，平均年龄 21.72 ± 2.3 岁)。被试筛选步骤与实验 1 相同。

3.2.2 实验材料

本研究设计了 3 种不同的题目：比例题、加法题和中立题目。所有的问题都以图片的形式呈现，每个题目具有相同的任务背景：两个主人公黄色矮人和绿色矮人正在挖钻石，随着时间的推移，两个人挖钻石的数量逐渐上升，两人的钻石数量都具有共变关系(即随着其中一个主人公钻石数量的变化，

另一个主人公的钻石数量也一起变化)。3 种题目的设计样例见图 2。

在每一张图片中,被试可以获得以下信息:1) 两位主人公挖钻石的数量随着时间的推移不断增加;2) 两位主人公在 3 个不同的时间点所挖到的钻石数量,其中最后一列绿矮人的钻石数量需要进行判断;3) 两个主人公之间的共变关系是属于比例关系、加法关系还是一致关系(依据前两个时间点的钻石数量推理得出)。例如在图 2a 中,第一个时间点表示当黄矮人挖了 1 个钻石的时候,绿矮人挖了 2 个;第二个时间点表示当黄矮人挖了 2 个钻石的时候,绿矮人挖了 4 个。依据前面两个时间点两位主人公的钻石数量,可以得知他们之间存在比例关系,即绿矮人挖钻石的速度是黄矮人的 2 倍。

被试的任务是依据前面两个时间点的钻石数量推论出两位主人公之间的共变关系,并判断最后一列钻石的数量(绿矮人所挖钻石的数量)是否正确。为了避免计算过于复杂,所有的钻石数量均在 10 以内,并且钻石数量之间的比均为小于或等于 3 的整数。对于比例题和加法题,有一半的题目给出的是比例答案(在比例题中为正确),而另一半题目给出的是加法答案(在加法题中为正确)。在加法问题中,由于第二个时间点的钻石数量之间为整数倍关系,这会诱发被试使用比例推理从而作出错误的判断。因此,为了成功解决这类题目,被试需要对比例策略进行抑制。

中立题在电脑屏幕上呈现的知觉特征都与比例题和加法题有高度的一致性,学生也同样需要对问题中的共变关系进行理解,但是学生在解决中立题时仅需要简单的比较而不需要进行加减乘除等运算(如比较两列钻石是否相等)。这一设置保证了被试在完成中立题目时所接受的视觉刺激以及图片理解过程与比例题目和加法题目保持一致,同时

也不需要激活或者抑制上述的两种策略。

3.2.3 实验设计

采用 2(实验条件:控制 vs.测试) \times 3(年级:6 年级、8 年级、成人)的混合实验设计,实验条件为被试内变量,因变量为被试在两种条件下对探测项目(比例题目)的反应时和错误率。

3.2.4 实验流程

实验 2 除了指导语与实验 1 不同之外,其他实验流程均一致。实验 2 的指导语为:“在我们的实验中,你将会看到如下的一幅图片(屏幕上有示例的图片出现)。这幅图表示随着时间的推移,两名矮人挖的钻石数量逐渐上升。你的任务是根据前面两个时间点的数量推断出两名矮人所挖钻石的数量之间属于什么关系,并判断第三个时间点中绿矮人所挖钻石的数量(带问号)是否正确。如果正确,请按‘J’键,如果错误,则按‘F’键。如果你明白上面的要求,请按等待实验员指示。”

3.3 实验结果

与实验 1 一样,负启动效应只能在被试正确解决加法问题的情况下出现,将加法问题的正确率低于 50%(含 50%)的被试剔除,同时剔除各类题目的平均反应时 ± 3 个标准差之外的数据。各年级的有效被试分别为 33 人(6 年级)、29 人(8 年级)、31 人(大学生)。实验 2 中被试在探测项目上的平均错误率和反应时见表 3。

剔除了数据之后,分别以错误率和反应时为因变量进行 2(实验条件:测试 vs.控制) \times 3(年级:6 年级、8 年级、大学生)的重复测量方差分析。

对探测项目的错误率进行分析之后发现实验条件的主效应不显著, $F(1, 89) = 0.002, p > 0.1$ 。实验条件与年级的交互效应不显著, $F(1, 89) = 2.189, p > 0.1$ 。说明实验条件及年级对学生解题成绩没有显著影响。

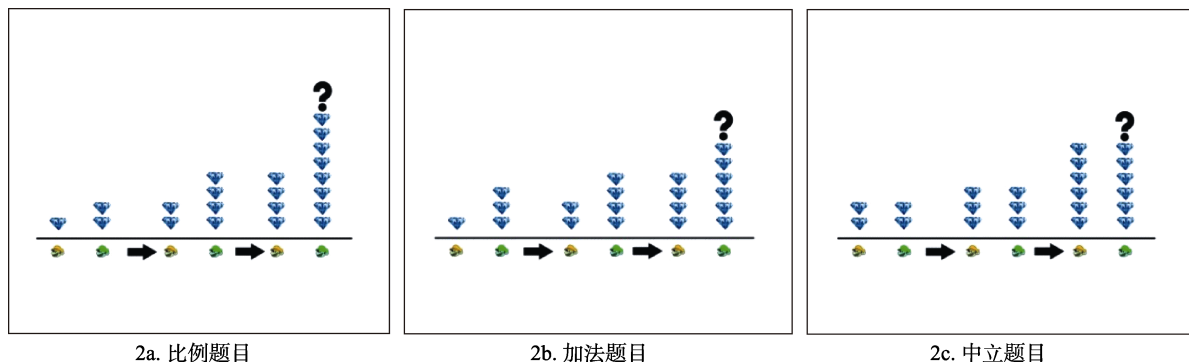


图 2 图片推理任务示例

表3 被试在实验2中探测项目上的错误率(%)和反应时(ms) ($M \pm SD$)

年级	错误率		反应时		负启动量
	控制条件	测试条件	控制条件	测试条件	
6 年级($n = 25$)	15.7 \pm 12.9	12.0 \pm 11.9	5407.6 \pm 1292.1	6099.6 \pm 1490.5	692.0 \pm 1049.1
8 年级($n = 26$)	16.8 \pm 12.7	16.3 \pm 11.8	5714.8 \pm 1907.5	6309.0 \pm 2110.3	594.2 \pm 967.3
大学生($n = 26$)	7.5 \pm 10.9	12.0 \pm 11.8	5798.6 \pm 1555.8	6274.4 \pm 1839.4	475.8 \pm 717.6

注: 负启动量 = 测试条件中探测项目的反应时 - 控制条件中探测项目的反应时

对探测项目的反应时进行分析之后发现实验条件的主效应显著, $F(1, 89) = 37.029, p < 0.01$, $\eta^2 = 0.294$, 被试解答测试条件中的比例题所需要的时间(6227.6 ± 1796.3)显著长于解答控制条件中的比例题所需要的时间(5640.3 ± 1579.4), 出现了负启动效应。实验条件与年级的交互效应不显著, $F(2, 89) = 0.438, p > 0.1$ 。这说明大中小学生在解决加法问题时都需要抑制控制过程的参与。

虽然被试的负启动量随着年级的增加而呈递减趋势(6 年级: 692.0 ± 1049.1 ; 8 年级: 594.2 ± 967.3 ; 大学生: 475.8 ± 717.6), 但是以年级为自变量的单因素方差分析结果显示, 年级的主效应不显著, $F(2, 74) = 0.438, p > 0.1$ 。说明各年级被试的抑制控制效率没有差别。

3.4 讨论

在降低了任务难度、减轻了被试的认知负荷后, 本研究发现, 大中小学生在测试条件下完成比例推理任务的反应时显著长于控制条件, 出现了负启动效应, 与实验 1 的结果一致, 进一步支持了抑制控制模型。与实验 1 一样, 实验 2 并未发现抑制控制效率存在年级差异, 说明成人与儿童和青少年一样, 在解决问题时都需要抑制启发式的偏差。需要指出的是, 这一结果是在降低了任务难度的情况下得出的。

以往研究认为抑制控制能力的发展可能体现在两个方面, 一个是抑制控制效率的提高, 表现为负启动量随着年龄的增长而减少; 另一个是抑制成功率的提高, 表现为被试解决抑制任务的错误率随着年龄的增长而降低(Frings, Feix, Röthig, Brüser, & Junge, 2007; Lubin et al., 2013; Pritchard & Neumann, 2009)。例如在 Lubin 等人(2013)的研究中, 因不一致项目的正确率低于 50%而被剔除的儿童被试占有所有儿童被试的 29%, 青少年被试为 9%, 而成人被试仅为 3%, Lubin 等人指出, 虽然该研究没有发现负启动量的年龄差异, 但是随着年龄的增长, 被试解决不一致问题的表现逐渐提高, 这在一定程度上反映出了抑制控制能力的提升。本研究中实验 1 也存在类似的结果, 从各年级的被试剔除率

来看, 小学生的剔除率最高(43%), 其次为中学生(31%), 大学生最低(21%), 说明抑制控制的成功率随着年龄的提高而逐渐提高, 而负启动量不具有年级差异, 这表明一旦被试成功抑制了比例策略, 他们所付出的认知代价(cognitive cost)是一样的。但是在实验 2 中, 当任务难度和认知负荷降低了之后, 各年级被试的剔除率则相对接近(大中小學生分别为 27%、25%、21%)。可见, 抑制控制能力是否表现出年龄差异也可能与任务难度和认知负荷有关——当任务难度和认知负荷降低之后, 认知成熟在任务中的优势便不存在了。Lubin 等人(2013)在研究中要求被试比较简单文字应用题, 刺激呈现的时间是不限时的(until response), 也就是并没有给被试施加时间压力, 结果未发现负启动量有年龄差异。本研究虽然设置了时间压力, 却未发现负启动效应存在年级差异, 原因也可能是由于较长的任务呈现时间所导致。未来的研究需要在呈现时间与正确率方面进行权衡。

在实验 1 和实验 2 中, 变量之间数值的比均为整数, 以往有研究表明数字比会影响比例策略的使用, 相对于非整数比, 整数比会诱导出更严重的过度使用比例推理的现象(Fernández et al., 2011, 2012; 李晓东等, 2014)。那么, 与整数比相比, 在非整数比的情况下, 被试是否更容易抑制比例推理的过度使用呢? 为此, 我们进行了实验 3, 考察数字比是否对负启动效应有影响。

4 实验 3a

4.1 实验目的

以缺值应用题作为实验材料, 采用负启动范式考察不同数字比类型对学生解决加法问题时的抑制控制是否有影响。

4.2 研究方法

4.2.1 被试

被试来自深圳市福田区实验学校(中、小学)、深圳市海滨实验小学、深圳市龙岗区石芽岭学校(中、小学)、深圳大学、广东工业大学和仲恺农业工程

学院。其中 6 年级学生 76 人(男 35 人, 女 41 人, 平均年龄 12.04 ± 0.5 岁), 8 年级学生 67 人(男 32 人, 女 35 人, 平均年龄 14.13 ± 0.5 岁), 大学生 77 人(男 47 人, 女 30 人, 平均年龄 20.43 ± 2.2 岁)。被试筛选步骤同实验 1。

4.2.2 实验设计

采用 2 (实验条件: 控制 vs. 测试) \times 2 (数字比类型: 整数比 vs. 非整数比) \times 3 (年级: 6 年级、8 年级、成人) 的混合实验设计, 其中, 实验条件为被试内变量, 数字比类型为被试间变量。因变量为被试在两种条件下对探测项目(比例题目)的反应时和错误率。

4.2.3 实验材料和实验流程

实验 3a 的材料同实验 1, 唯一不同的是本实验的加法问题分为整数比与非整数比两种类型, 在整数比类型中, 加法题的设置与实验 1 一致, 而在非整数比类型中, 加法题中的数字之间的比率不为整数。实验流程与实验 1 相同。

4.3 实验结果

依据负启动的逻辑, 将加法问题的正确率低于 50% (含 50%) 的被试剔除, 同时剔除各类题目的平均反应时 ± 3 个标准差之外的数据。各年级的有效被试分别为 47 名(6 年级)、50 名(8 年级)学生、52 名(大学生), 实验 3a 中各项目的平均反应时和错误率见表 4。

剔除了数据之后, 分别对探测项目的错误率和反应时进行 2 (实验条件: 测试 vs. 控制) \times 3 (年级: 6 年级、8 年级、大学生) \times 2 (数字比类型: 整数比 vs. 非整数比) 的重复测量方差分析。

对探测项目的错误率进行分析之后发现实验条件的主效应不显著, $F(1, 143) = 1.373, p > 0.1$ 。实验条件与年级的交互效应不显著, $F(2, 143) = 1.407, p > 0.1$, 实验条件与数字比的交互作用不显著, $F(1, 143) = 0.704, p > 0.1, \eta^2 < 0.01$ 。实验条件、年级和

数字比三者的交互作用不显著, $F(2, 143) = 0.128, p > 0.1$ 。说明实验条件、年级和数字比类型对学生解题成绩均没有显著影响。

对探测项目的反应时进行分析之后发现实验条件的主效应显著, $F(1, 143) = 27.455, p < 0.01, \eta^2 = 0.161$, 被试解答测试条件中的比例题所需要的时间(7193.8 ± 2463.5 ms)显著长于其解答控制条件中的比例题所需要的时间(6622.2 ± 2333.3 ms), 出现了负启动效应。实验条件与年级的交互效应不显著, $F(2, 143) = 0.426, p > 0.1$ 。这说明上述的负启动效应在 3 个年级的被试中都比较一致。实验条件与数字比的交互作用不显著, $F(1, 143) = 1.358, p > 0.1$, 说明数字比对抑制控制过程没有影响。实验条件、年级和数字比三者的交互作用不显著, $F(2, 143) = 0.567, p > 0.1$ 。

对于负启动量的分析发现, 虽然整数比条件下的负启动量比非整数比条件下的负启动量更大(整数比: 694.7 ± 1088.5 ms; 非整数比: 441.9 ± 1296.6 ms), 但是对负启动量进行 2 (数字比类型: 整数比 vs. 非整数比) \times 3 (年级: 6 年级、8 年级、大学生) 的方差分析显示数字比类型主效应不显著, $F(1, 143) = 1.358, p > 0.1$ 。与此同时, 年级的主效应以及年级和数字比的交互效应均不显著, $ps > 0.1$ 。

4.4 讨论

在实验 3a 中, 我们重点考察了数字比与实验条件之间在负启动效应上是否存在交互作用。结果发现, 不论是整数比还是非整数比的条件下, 各年级被试均出现了显著的负启动效应, 证实了被试在解决缺值型加法应用题时需要抑制控制的参与。同时年级对负启动量没有显著影响, 说明大中小学生在抑制控制效率上未表现出发展性的变化。总之, 实验 3a 进一步验证了实验 1 的结果, 排除了实验 1 的负启动效应可能是由于题目中的数字比均为整数比造成的可能性。

表 4 被试在实验 3a 中探测项目上的错误率(%)和反应时(ms) ($M \pm SD$)

数字比类型	年级	错误率		反应时		负启动量
		控制条件	测试条件	控制条件	测试条件	
整数比	6 年级($n = 25$)	9.8 ± 10.7	10.3 ± 12.7	6748.9 ± 1653.4	7684.6 ± 1967.9	935.7 ± 905.9
	8 年级($n = 26$)	12.8 ± 12.4	11.8 ± 10.8	7464.9 ± 2514.8	8167.3 ± 2584.1	702.4 ± 1230.7
	大学生($n = 26$)	12.3 ± 13.1	13.7 ± 11.8	6300.2 ± 2334.2	6746.0 ± 2267.0	445.9 ± 1085.6
非整数比	6 年级($n = 22$)	10.6 ± 11.6	12.4 ± 14.3	7871.0 ± 2602.5	8230.4 ± 2746.1	359.4 ± 2006.2
	8 年级($n = 24$)	18.5 ± 13.7	18.0 ± 14.6	5991.6 ± 2179.4	6546.4 ± 1964.2	554.8 ± 1248.4
	大学生($n = 26$)	6.2 ± 11.7	10.0 ± 11.6	5505.5 ± 1964.2	5917.0 ± 2122.2	411.4 ± 1300.8

注: 负启动量 = 测试条件中探测项目的反应时 - 控制条件中探测项目的反应时

5 实验 3b

5.1 实验目的

以图片推理题作为实验材料, 在降低任务难度和加工负荷的情况下, 考察不同数字比类型对学生解决加法问题时的抑制控制是否有影响。

5.2 研究方法

5.2.1 被试

被试来自深圳市福田区实验学校(中、小学)、深圳市海滨实验小学、深圳市龙岗区石芽岭学校(中、小学)、深圳大学、广东工业大学和仲恺农业工程学院。其中 6 年级学生 75 人(男 34 人, 女 41 人, 平均年龄 12.02 ± 0.5 岁), 8 年级学生 67 人(男 32 人, 女 35 人, 平均年龄 14.16 ± 0.5 岁), 大学生 73 人(男 41 人, 女 32 人, 平均年龄 21.45 ± 2.3 岁)。被试筛选步骤同实验 1。

5.2.2 实验设计

采用 2(实验条件: 控制 vs. 测试) \times 2(数字比类型: 整数比 vs. 非整数比) \times 3(年级: 6 年级、8 年级、成人)的混合实验设计, 其中, 实验条件为被试内变量, 数字比类型为被试间变量。因变量为被试在两种条件下对探测项目(比例题目)的反应时和错误率。

5.2.3 实验材料和实验流程

本研究设计了 3 种不同的题目: 比例题、加法题和中立题。所有题目的设置都与实验 2 一致, 所不同的是, 实验 3b 中加入了非整数比类型的加法题目。实验流程同实验 2。

5.3 实验结果

依据负启动的逻辑, 将加法问题的正确率低于 50%(含 50%)的被试剔除, 同时剔除各类题目的平均反应时 ± 3 个标准差之外的数据。各年级有效被试分别为 59 名(6 年级)、50 名(8 年级)、56 名(大学

生)。实验 3b 中被试在探测项目的平均错误率和反应时见表 5。

剔除了数据之后, 采用 2(实验条件: 测试 vs. 控制) \times 3(年级: 6 年级、8 年级、大学生) \times 2(数字比类型: 整数比 vs. 非整数比)的重复测量方差分析对探测项目的反应时和错误率分开进行统计分析。

对探测项目的错误率进行分析之后发现实验条件的主效应不显著, $F(1, 161) = 0.038, p > 0.1$ 。实验条件与年级的交互效应不显著, $F(2, 161) = 0.864, p > 0.1$ 。实验条件与数字比的交互作用不显著, $F(1, 161) = 0.017, p > 0.1$ 。实验条件、年级和数字比三者的交互作用不显著, $F(2, 161) = 1.548, p > 0.1$ 。说明实验条件、年级和数字比类型对学生解题成绩均没有显著影响。

对探测项目的反应时进行分析之后发现实验条件的主效应显著, $F(1, 161) = 27.984, p < 0.01, \eta^2 = 0.148$, 被试解答测试条件中的比例题所需要的时间(6193.9 ± 1866.2)显著长于其解答控制条件中的比例题所需要的时间(5813.6 ± 1661.5), 出现了负启动效应。年级主效应不显著, $F(2, 161) = 0.377, p > 0.1$ 。实验条件与年级的交互效应不显著, $F(2, 161) = 0.432, p > 0.1$ 。这说明上述的负启动效应应在 3 个年级的被试中都比较一致。

数字比与实验条件的交互作用显著, $F(1, 161) = 8.293, p < 0.01, \eta^2 = 0.049$ 。进一步进行简单效应分析表明, 在整数比条件下, 被试在控制条件和测试条件中对比例题的反应时有显著差异(控制条件: 5640.3 ± 1579.4 ms vs. 测试条件 6227.6 ± 1796.3 ms, $p < 0.01$), 出现了负启动效应。而在非整数比条件下, 被试在两类试次中对比例题的反应时没有差异(控制条件: 5987.0 ± 1745.6 ms vs. 测试条件 6160.3 ± 1960.5 ms, $p > 0.1$)。数字比、年级与实验条件三者的交互作用不显著, $F(1, 161) = 0.172, p > 0.1$ 。

表 5 被试在实验 3b 中探测项目上的错误率(%)和反应时(ms) ($M \pm SD$)

数字比类型	年级	错误率		反应时		负启动量
		控制条件	测试条件	控制条件	测试条件	
整数比	6 年级($n = 25$)	15.7 ± 12.9	12.0 ± 11.9	5407.6 ± 1292.1	6099.6 ± 1490.5	692.0 ± 1049.1
	8 年级($n = 26$)	16.8 ± 12.7	16.3 ± 11.8	5714.8 ± 1907.5	6309.0 ± 2110.3	594.2 ± 967.3
	大学生($n = 26$)	7.5 ± 10.9	12.0 ± 11.8	5798.6 ± 1555.8	6274.4 ± 1839.4	475.8 ± 717.6
非整数比	6 年级($n = 22$)	13.3 ± 12.1	14.7 ± 14.0	6350.3 ± 1634.2	6548.2 ± 1932.9	197.9 ± 1007.0
	8 年级($n = 24$)	21.5 ± 11.4	21.0 ± 12.1	5513.8 ± 1741.8	5813.0 ± 2108.7	299.2 ± 851.7
	大学生($n = 26$)	9.0 ± 10.8	9.0 ± 11.9	6096.9 ± 1823.4	6119.7 ± 1859.7	22.8 ± 888.7

注: 负启动量 = 测试条件中探测项目的反应时 - 控制条件中探测项目的反应时

对于负启动量进行 2(数字比类型: 整数比 vs. 非整数比) \times 3(年级: 6 年级、8 年级、大学生)的方差分析显示, 数字比类型主效应显著, $F(1, 161) = 8.293, p < 0.01, \eta^2 = 0.049$ 。整数比条件下的负启动量显著大于非整数比条件下的负启动量(587.3 ± 917.3 vs. 173.2 ± 915.5)。此外, 数字比类型与年级的交互效应不显著, $F(2, 161) = 0.174, p > 0.1$ 。

5.4 讨论

采用图片推理任务后, 我们发现数字比与实验条件产生了显著的交互作用, 在整数比的情况下出现了负启动效应, 与实验 2 结果一致; 但是在非整数比的情况下, 则没有出现负启动效应。说明在图片推理任务的情况下, 加法问题中的整数比诱发了较强的过度使用比例的倾向, 被试需要对比比例策略进行抑制, 因而在随后的比例问题上的反应时出现了明显的延迟。但是在非整数比的情况下, 被试在解决加法问题时不会受到比例推理的干扰, 更易于正确表征问题、从而得到正确答案。实验 3a 和实验 3b 在数字比的影响方面出现了不同的结果, 可能是由于两个实验中实验材料的不同所导致。虽然两个实验都涉及加法与比例问题, 但实验 3a 是以缺值形式出现, 实验 3b 则不是缺值形式。以往研究表明, 缺值形式和数字比对过度使用比例推理现象均产生影响 (Fernández et al., 2011, 2012; van Dooren et al., 2010; 李晓东等, 2014), 但是这些研究是以解题成绩为指标的。本研究是在被试正确解决问题的前提下, 以有无负启动效应为指标, 是对过度使用比例推理认知机制的揭示。本研究结果可能说明当缺值形式与不同类型的数字比同时存在时, 缺值形式可能是诱发过度使用比例推理的主要因素; 当问题不以缺值形式呈现时, 整数比是诱发过度使用比例推理的重要因素。与前 3 个实验一致, 本实验再次证明成人与儿童和青少年的抑制控制效率不存在发展性差异。

6 总讨论

6.1 抑制控制在解决加法应用题中的作用

抑制控制是执行功能的一个核心成分, 它是一种领域一般(domain-general)的认知过程, 能让个体克服强烈的内在倾向或外在诱惑去做出合适的反应 (Diamond, 2013)。新皮亚杰学派提出的抑制控制模型认为, 问题解决领域中的抑制控制表现为个体对启发式策略或过度学习的策略的抑制。当抑制控制无法充分发挥作用时, 即使掌握了相应的知识与

概念, 个体在解决问题时依然会出错。该模型指出, 抑制控制能力在人的一生中都持续发挥作用, 即使是成人在解决问题时也需要抑制不恰当策略的干扰 (Houdé & Borst, 2015)。本研究 3 个实验的结果均发现被试在正确解决加法问题之后再解决比例问题时, 反应时明显延长, 出现了负启动效应。这一结果表明对于大中小学生来说, 要正确解决加法问题不仅需要理解加法问题的内在逻辑, 也需要抑制比例策略的使用。

从数学学习的课程体系来讲, 加法知识在前, 比例知识在后。加法思维是基于绝对量的考量, 比例思维是基于相对量的考量, 因此加法问题的难度是低于比例问题的。理解加法问题的内在逻辑对于本研究的被试而言应该不具有挑战性, 但是仍然有许多被试因在回答加法问题时使用了比例方法而被剔除。本研究发现正确解决加法问题需要抑制比例策略, 因此可以推测那些在解决加法问题时错误地使用了比例策略的学生, 更可能是由于他们对比例策略的抑制失败造成的, 而不是由于他们无法理解加法问题所表达的数量关系。换言之, 过度使用比例推理更可能是抑制控制没有充分发挥作用的结果。

许多研究表明抑制控制在数学问题解决的过程中具有重要的作用, 它能帮助个体克服某些直觉偏差或过度学习的策略 (Obersteiner, van Dooren, van Hoof, & Verschaffel, 2013; van Dooren & Inglis, 2015; 付馨晨, 李晓东, 2015; 李晓东, 徐雯, 李娜燕, 2012; 张丽, 辛自强, 王琦, 李红, 2012)。而本研究也发现无论是对于数学缺值应用题, 还是对于图片推理任务, 正确解决加法问题都需要抑制比例策略。相比以往的研究, 本研究中的两类问题更加复杂, 均需要两步或以上的计算步骤, 这说明在相对复杂的数学问题解决或推理任务中仍然需要抑制控制的参与, 同时也说明将负启动范式应用在复杂问题解决或高级推理的研究中是可行的。

6.2 抑制控制能力的发展

在本研究的 3 个实验中, 被试的负启动量随着年级的增长而减少, 但是, 统计分析均没有发现负启动量存在年级差异, 这说明大中小学生的抑制控制效率并没有差异。这一点与 Houdé 等人的研究所提出的“抑制控制效率会随着年龄的增长而提高”的观点不符 (Houdé et al., 2011; Houdé & Borst, 2014)。实际上, 以往的研究关于负启动量是否会随着年龄的增长而降低并没有一致的结论。例如有研

究发现儿童在完成注意冲突任务时并没有出现负启动效应,但是随着年龄的增长,这一效应却出现了(Tipper, Bourque, Anderson, & Brehaut, 1989)。而另一些研究则发现,被试在解决冲突性问题(不一致问题)的错误率会随着年龄的增长而降低,这可能是抑制控制能力提高的结果;但是对于正确解决问题的被试,他们的负启动量则不存在年龄差异,不同年龄段的被试其抑制控制效率的水平是相当的(comparable) (Frings et al., 2007; Lubin, Houdé, & de Neys, 2015; Pritchard & Neumann, 2009)。

之所以出现这些不一致的结论,可能跟不同实验任务需要不同的抑制控制过程有关。Borst 等人(2013)提出,依据不同的任务,负启动效应可以反映出两种抑制过程,一种是针对刺激(stimuli)的“自动抑制(automatic inhibition)”,如经典的 stroop 任务中对颜色词的抑制,而另一种是针对策略(strategy)的“有意抑制(intentional inhibition)”,如对“多即是加,少即是减”这一策略的抑制。有研究指出,这两种抑制依赖于大脑的不同部位,例如有意抑制更多依赖于前额叶皮层(prefrontal cortex),而自动抑制则不需要,它更多的是依赖于大脑中的后感觉部位(posterior sensory parts) (Vuilleumier, Schwartz, Duhoux, Dolan, & Driver, 2005),更重要的是,这两个部位的成熟时间是不一样的,前额叶皮层的成熟时间大约在青少年时期,而后感觉部位在儿童期已经成熟(Gogtay et al., 2004)。在本研究中,被试在解决加法问题时很大程度上需要同时进行两种抑制:对于文字应用题中出现的整数倍数字以及图片推理任务中整数倍关系的钻石数量,被试需要对这些外源性的刺激进行自动抑制,而对于内源性的使用比例推理的倾向,被试则需要对其进行有意抑制。当这两种抑制混合在一起的时候,负启动效应的发展趋势变得不明显。

总体上,从我们的研究结果中可以得知被试在解决加法问题的错误率随着年级的增长而降低,这可能是抑制控制能力提高的结果,但是对于成功抑制了比例策略的被试,他们的抑制控制效率不存在年级差异。未来的研究可以采用事件相关电位(ERP)或功能核磁共振(fMRI)等技术对抑制控制效率的发展趋势进行进一步地探讨。

6.3 数字比类型对抑制控制的影响

本研究发现当实验材料为数学缺值应用题时,不同数字比类型下被试的负启动量不存在显著差异,但是在图片推理任务中,不同数字比类型下被

试的负启动量存在显著差异——非整数比条件下的负启动量显著小于整数比条件下的负启动量。这可能是问题形式造成的。在解决加法问题时,被试能够非常直观地看到图片上钻石的数量之间的比是否为整数,当图片中两位主人公的钻石数量之比不为整数时,由于不存在文字应用题中缺值结构的影响,被试可以很快推理出两位主人公之间的关系并作出判断,从而在抑制比例策略时不需要消耗太多的认知资源甚至不需要对比例策略进行抑制。这表明在排除了缺值问题结构的影响后,数字比类型对被试的抑制控制过程有很大的影响,进一步证实了数字比类型不仅会影响被试能否对比例策略进行抑制,而且还会影响被试的抑制控制过程这一观点。本研究并没有发现数字比类型对不同年级的被试会产生不同的影响,这与前人使用纸笔测验的研究结果一致(Fernández et al., 2010, 2012; van Dooren et al., 2009)。本研究认为,数字比类型作为一种外源刺激,它会影响被试在解决加法问题时的抑制过程而不会影响被试对策略的抑制过程,依据前文的描述,被试对刺激的抑制机能在儿童期已经成熟(Gogtay et al., 2004),而本研究最小年龄组的被试为6年级的学生,其抑制机能的发育可能已经达到成熟水平,与青少年及成人的抑制机能水平相当,因此数字比类型与年级的交互作用不显著。

6.4 局限与展望

虽然本研究得到了许多启发性的结果,但是在整体的研究过程中,仍然存在以下的局限性:首先,被试的剔除率较高。实验数据的剔除主要是因为部分被试过度使用了比例推理,他们在完成实验任务时依然保持了原来的解题习惯,很难提高自己在问题解答时的自我监控的意识,但是较高的错误率依然反映出了实验任务的难度需要进一步调整。

其次,需要明确的是被试在解决问题时是否探测到了启发式偏差(或误导性策略)与问题情境之间有冲突。如果被试没有探测到这一冲突的存在,则不需要对偏差或误导性策略进行抑制(De Neys, Moyens, & Vansteenwegen, 2010)。依据这一观点,如果被试在解决冲突性问题时所产生的错误是因为没有探测到冲突的存在而不是无法抑制诱导性策略,那么负启动效应可能反映的并不是抑制过程而是其他认知成分。而Lubin 等人近期的一项研究通过分析被试在解决完冲突问题之后对答案的确信度(即评价自己给出的答案在多大程度上是正确的),发现对于冲突题目,被试回答错误时所给出

的确信度显著低于正确回答时的确信度(Lubin et al., 2015)。这说明在解决冲突题目时, 被试做出错误反应之后对自己答案更加不确定, 表明他们能够监测到冲突的存在。因此, 对于被试在解决非比例问题的过程中能否探测到比例策略与问题情境之间存在冲突这一问题, 未来的研究可以采用评价确信度的方式对其进行探讨。

最后, 近期有研究表明, 一些提示和警告能够提高学生解决问题时对误导性策略的抑制能力, 当学生能够意识到自己的错误策略时, 他们解决问题的表现也更好(Babai, Shalev, & Stavy, 2015; De Neys, Lubin, & Houdé, 2014; Stavy & Babai, 2010; Volckaert & Noël, 2015)。但是这些研究大多没有考虑这种获得性的抑制能力是否具有迁移的效果。能力的迁移是检验一种训练有效与否的一个重要考量标准, 如果获得性的能力无法迁移, 它仍应该被看作应对某一特定问题的技巧, 相应的训练效果也无法得到保障。因此, 未来的研究可以探讨相关训练或提示是否能提高学生解决非比例问题的表现, 并且通过新的题目类型来检验这种训练方式是否具有迁移效应。

参 考 文 献

- Babai, R., Shalev, E., & Stavy, R. (2015). A warning intervention improves students' ability to overcome intuitive interference. *ZDM*, 47, 735–745.
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49, 1366–1374.
- De Bock, D., van Dooren, W., Janssens, D., & Verschaffel, L. (2002). Improper use of linear reasoning: An in-depth study of the nature and the irresistibility of secondary school students' errors. *Educational Studies in Mathematics*, 50, 311–334.
- De Bock, D., van Dooren, W., Janssens, D., & Verschaffel, L. (2007). *The illusion of linearity: From analysis to improvement*. US: Springer.
- De Neys, W., Lubin, A., & Houdé, O. (2014). The smart nonconservator: Preschoolers detect their number conservation errors. *Child Development Research*, 2014, Article ID 768186.
- De Neys, W., Moyens, E., & Vansteenwegen, D. (2010). Feeling we're biased: Autonomic arousal and reasoning conflict. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 10, 208–216.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135–168.
- Fernández, C., Llinares, S., van Dooren, W., De Bock, D., & Verschaffel, L. (2011). Effect of number structure and nature of quantities on secondary school students' proportional reasoning. *Studia Psychologica*, 53, 69–81.
- Fernández, C., Llinares, S., van Dooren, W., De Bock, D., & Verschaffel, L. (2012). The development of students' use of additive and proportional methods along primary and secondary school. *European Journal of Psychology of Education*, 27, 421–438.
- Frings, C., Feix, S., Röthig, U., Brüser, C., & Junge, M. (2007). Children do show negative priming: Further evidence for early development of an intact selective control mechanism. *Developmental Psychology*, 43, 1269–1273.
- Fu, X. C., & Li, X. D. (2015). Intuitive rules in school mathematical comparison tasks. *Education Research Monthly*, (2), 106–111.
- [付馨晨, 李晓东. (2015). 中小学数学比较任务中的直觉法则研究与展望. *教育学术月刊*, (2), 106–111.]
- Fu, X. C., & Li, X. D. (2017). Cognitive Inhibition: A new perspective on problem solving. *Journal of Psychological Science*, 40(1), 58–63.
- [付馨晨, 李晓东. (2017). 认知抑制——问题解决研究的新视角. *心理科学*, 40(1), 58–63]
- Gillard, E., Van Dooren, W., Schaeken, W., & Verschaffel, L. (2009). Dual processes in the psychology of mathematics education and cognitive psychology. *Human Development*, 52(2), 95–108.
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., ... Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 8174–8179.
- Houdé, O. (2007). First insights on “neuropsychology of reasoning”. *Thinking & Reasoning*, 13, 81–89.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., ... Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110, 332–346.
- Houdé, O., & Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Psychology*, 5, 616.
- Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience* 9, 148.
- Jiang, R. H., Li, X. D., Fernández, C., & Fu, X. C. (in press). Students' performance on missing-value word problems: A cross-national developmental study. *European Journal of Psychology of Education*, doi: 10.1007/s10212-016-0322-9
- Lesh, R., Post, T., & Behr, M. (1988). Proportional reasoning. In M. Behr & J. Hiebert (Eds.), *Number concepts and operations in the middle grades* (vol. 2, pp. 93–118). Reston: National Council of Teachers of Mathematics.
- Li, X. D., Jiang, R. H., & Qian, Y. J. (2014). 5~8 graders' overuse of proportionality on missing-value problems. *Journal of Mathematics Education*, 23(6), 73–77.
- [李晓东, 江荣焕, 钱玉娟. (2014). 中小学生对比例推理的过度使用. *数学教育学报*, 23(6), 73–77.]
- Li, X. D., Xu, W., & Li, N. Y. (2012). The negative priming effect in Piaget-like tasks in the “Infra-logic” domain. *Journal of Psychological Science*, 35(2), 358–363.
- [李晓东, 徐雯, 李娜燕. (2012). 潜逻辑运算类皮亚杰守恒任务中的负启动效应. *心理科学*, 35(2), 358–363.]
- Lubin, A., Houdé, O., & de Neys, W. (2015). Evidence for children's error sensitivity during arithmetic word problem solving. *Learning and Instruction*, 40, 1–8.
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O., & Borst, G. (2013).

- Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105, 701–708.
- Meert, G., Grégoire, J., & Noël, M. (2010). Comparing the magnitude of two fractions with common components: Which representations are used by 10- and 12-year-olds? *Journal of Experimental Child Psychology*, 107, 244–259.
- Obersteiner, A., van Dooren, W., van Hoof, J., & Verschaffel, L. (2013). The natural number bias and magnitude representation in fraction comparison by expert mathematicians. *Learning and Instruction*, 28, 64–72.
- Osman, M., & Stavy, R. (2006). Development of intuitive rules: Evaluating the application of the dual-system framework to understanding children's intuitive reasoning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13, 935–953.
- Pritchard, V. E., & Neumann, E. (2009). Avoiding the potential pitfalls of using negative priming tasks in developmental studies: Assessing inhibitory control in children, adolescents, and adults. *Developmental Psychology*, 45, 272–283.
- Stavy, R., & Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: Insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM*, 42, 621–633.
- Tipper, S. P., Bourque, T. A., Anderson, S. H., & Brehaut, J. C. (1989). Mechanisms of attention: A developmental study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 353–378.
- Tjoe, H., & de la Torre, J. (2014). On recognizing proportionality: Does the ability to solve missing value proportional problems presuppose the conception of proportional reasoning? *The Journal of Mathematical Behavior*, 33, 1–7.
- van Dooren, W., De Bock, D., Evers, M., & Verschaffel, L. (2009). Students' overuse of proportionality on missing-value problems: How numbers may change solutions. *Journal for Research in Mathematics Education*, 40(2), 187–211.
- van Dooren, W., De Bock, D., Vleugels, K., & Verschaffel, L. (2010). Just answering... or thinking? Contrasting pupils' solutions and classifications of missing-value word problems. *Mathematical Thinking and Learning*, 12, 20–35.
- van Dooren, W., & Inglis, M. (2015). Inhibitory control in mathematical thinking, learning and problem solving: A survey. *ZDM*, 47, 713–721.
- Volckaert, A. M. S., & Noël, M. P. (2015). Training executive function in preschoolers reduce externalizing behaviors. *Trends in Neuroscience and Education*, 4, 37–47.
- Vuilleumier, P., Schwartz, S., Duhaux, S., Dolan, R. J., & Driver, J. (2005). Selective attention modulates neural substrates of repetition priming and "implicit" visual memory: Suppressions and enhancements revealed by fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 1245–1260.
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2010). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami (Ed.), *The wiley-blackwell handbook of childhood cognitive development* (2nd ed., pp. 574–603). Oxford: Wiley-Blackwell.
- Zhang, L., Xin, Z. Q., Wang, Q., & Li, H. (2012). The influence of constituent integers on the processing of fractions. *Psychological Development and Education*, 28(1), 31–38.
- [张丽, 辛自强, 王琦, 李红. (2012). 整数构成对分数加工的影响. *心理发展与教育*, 28(1), 31–38.]

The overuse of proportional reasoning and its cognitive mechanism: A developmental negative priming study

JIANG Ronghuan¹; LI Xiaodong²

(¹ School of Psychology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(² College of Psychology and Sociology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract

The overuse of proportional reasoning refers to a phenomenon that students improperly use proportional reasoning to solve non-proportional problems (e.g., addition problems in the present study). No research to date has directly illuminated the cognitive mechanism of the phenomenon since it is widely found in different countries and different ages. Therefore, we aimed to explore the potential cognitive mechanism in the current study from a new perspective based on the Inhibitory Control Model. The model suggests that solving a problem successfully not only requires the grasp of the underlying logic but also the inhibition of the misleading strategies. Accordingly, we proposed a hypothesis that the failure to inhibit the improper proportional thinking rather than the failure to grasp the additive logic would lead to students' overuse of proportional reasoning since they may have already mastered additive thinking.

We conducted three experiments with sixth-grade children, eighth-grade adolescents, and young adults (college students) to test this hypothesis using the Negative Priming (NP) paradigm. Participants performed a pair of problems: an addition problem in the prime stage, a proportion problem in the probe stage. The logic of NP paradigm is as follows: if participants inhibited the proportional strategy in the prime stage, they would pay a price to activate it in the subsequent probe stage as revealed by a slower response or a higher error rate.

In experiment 1, we used missing-value word problems. For each test trial, an addition problem served as a

prime and a proportion problem served as a probe; for each control trial, a neutral problem served as a prime and a proportion problem served as a probe. Participants' performance was measured on the probe stage and their performance was compared between test-probes and control-probes. We found a NP effect in all the three age groups, but there was no significant difference among them. In experiment 2, we reduced task difficulty and cognitive load by creating a visual reasoning task and replicated the results in experiment 1. In experiment 3, we manipulated the number ratio (integer vs. non-integer) of the tasks, and the other conditions were the same as those we did in experiment 1 and experiment 2. Again, NP effects were found in missing-value word problem no matter number ratio was an integer or not. However, in the visual reasoning task, the NP effect only existed in the integer ratio condition.

These results indicated: First, children, adolescents and adults all need inhibitory control to overcome the overuse of proportional reasoning. This confirms that success in problem-solving requires not only the grasp the underlying logic of the problem but also the inhibition of a misleading strategy. Second, the potential age difference in inhibitory control ability cannot be eliminated though we found no developmental difference in inhibitory control efficiency according to the magnitude of the NP effect in this study. More research with other methods (e.g., ERP, fMRI) is needed to shed light on this. These results also have important implication for mathematic education. Intervention program that aim at improving inhibitory control or meta-cognition ability for students with low math achievement should be considered.

Key words proportional reasoning; inhibitory control; negative priming; missing-value word problem; mathematics cognition