

加法运算中数学知识和语义知识的整合*

陈栩茜 何本炫 张积家

(华南师范大学心理应用研究中心、心理学系, 广州 510631)

摘 要 采用语义启动数字匹配任务及其变式, 探讨在中文背景下“和效应”和语义系统的类比一致性及其产生机制。结果发现, 中国学生对“和”目标数字的反应时显著长于对中性目标数字, 表明“和效应”是人类的一种强烈的认知倾向; 人类通过类比映射方式整合数学知识和语义知识; 影响语义加工的因素同样影响数学认知。研究还发现, 被试对中性目标数字的抑制难度受语义匹配任务性质的影响, 在完成类别不一致的探测词匹配任务时, 拒绝中性目标数字的反应时显著长, “和效应”消失, 表明“和效应”不仅源自于对“和”目标数字的激活, 也源自于对中性目标数字的抑制。

关键词 数学认知; 加法运算; 语义整合; 类比映射

分类号 B842

1 前言

数学认知是人类认识客观世界所必需的基本能力。研究数学认知, 可以深入了解数学认知的来源、结构和机制, 对记忆、语言研究也具有借鉴作用。近年来, 数学认知是心理学和认知神经科学关注的热点。研究者从进化心理学(Brannon & Terrace, 1998; Dehaene, Molko, & Wilson, 2004; Nieder, Freedman, & Miller, 2002;)、发展心理学(Xu, Spelke, & Goddard, 2005; 张真, 苏彦捷, 2007)和认知神经科学(Piazza, Izard, Pinel, Bihan, & Dehaene, 2004)角度研究数学认知的表征和加工, 提出了若干个理论模型。其中, 影响较大的有图表搜索理论(Table Search Theory)、网络提取理论(Network Retrieval Theory)、联结分布理论(Distribution of Association Theory)、抽象表征理论(Abstract Representation Theory)、三重编码理论(Tri-code Model)以及复杂编码模型(Encoding Complex model) (张红川, 董奇, 2002)。这些模型的侧重点不同, 但都认为在长时记忆中有一个数字网络表征和存储与算术有关的知识。数字网络的结构和作用机制与语义网络相似, 具有数学联系的数字通过激活扩散相互激活(如:

“5+3”激活“8”)。

已有的数学认知理论得到了行为研究和认知神经科学研究的支持(Dehaene, 1996; Dehaene & Cohen, 1997; Temple, 1991)。但也存在问题(Pesenti, Thioux, Seron, & De Volder, 2000; van Karskamp & Ciplotti, 2001)。研究者对实验结果是否真实地反映了现实生活中的数学认知机制表示怀疑。这一类研究存在着两大弊端:(1)割裂了数学认知与现实生活的联系。生活情境(real-life context)对数学认知往往具有很大的影响(Martini, Domahs, Benke, & Delazer, 2003; Nunes, Schliemann, & Carraher, 1993;), 而实验室中的数学运算往往是无情境的和无意义的;(2)割裂了数学认知系统与其它认知系统的联系。数学认知系统的加工涉及多个认知功能系统的活动。这些认知功能系统包括记忆、注意和语言等。现有的理论较少关注数学认知系统与其它认知功能系统的相互作用, 不足以反映数学认知系统的全貌。

数学认知系统与语言认知系统是否存在着联系? 种族进化史和早期来自脑损伤病人的报告认为, 数学认知系统和语言认知系统是分离的(Hermelin & O'Connor, 1990; 连四清, 方运加,

收稿日期: 2011-09-08

* 教育部人文社会科学重点研究基地项目(08JJDXXL269); 教育部留学回国人员科研启动基金。

通讯作者: 张积家, E-mail: Zhangjj@scnu.edu.cn

2006; Rossor, Warrington, & Cipolotti, 1995)。当代的研究者认为, 数学认知系统和语言认知系统相互联系, 特别是与语义表征系统的联系更为紧密。研究发现, 动物和婴儿虽然具有初级的数学认知能力, 却很难掌握 4 以上的数学运算 (Cowan, 2002; Sulkowski & Hauser, 2001; Vogel, Woodman, & Luck, 2001)。Dehaene (2001)认为, 人类拥有复杂精确的计算能力离不开高度发展的语言功能。语言的发展促使个体发展出一套基于数符号系统的认知功能。数学认知发展是在自然进化与文化进化的交互作用下不断地修饰先天具有的“数意识(number sense)”的过程, 这种交互作用就体现为数学能力与语言能力的密切联系。这一观点得到了脑损伤病人研究的支持(南云, 罗跃嘉, 2003; Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan, & Dehaene, 2002)。数学文字题解决中出现的语义一致现象为数学认知系统与语义系统之间的密切联系提供了证据。语义一致现象(semantic alignment)是指在具体的情境中, 人总是寻求数学认知和客体的语义关系匹配的认知倾向(Bassok, 2001)。Bassok, Wu 和 Olseth (1995)在考察大学生创建的数学文字题时发现, 当呈现类别相关的概念时, 78%的大学生创建出适合于加法的问题; 当呈现功能相关的概念时, 87%的大学生创建出适合于除法的问题。Bassok, Chase 和 Martin (1998)发现, 当呈现类别相关的概念时, 大学生倾向于做加法运算; 当呈现功能相关概念时, 他们倾向于做除法运算。他们还发现了一个有趣的现象: 当面对功能相关的概念(如: 苹果-果篮)时, 为了保持数学知识和语义知识的一致, 许多大学生采取了“语义回避(semantic escape)”的策略, 如增加一个新的客体(如: 雪梨), 构造出更加复杂的数学问题[如: (5个苹果+3个雪梨)/2个果篮=4个水果/果篮]。Martin 和 Bassok (2005)发现, 初中生和大学生在解决除法文字题时也出现了语义一致现象。这种语义一致现象与人们在解决数学文字题时的经验相符。根据 Bassok 等(1998)对学生教材的不完全统计, 所有适合加法运算的文字题所涉及的客体之间关系都是类别相关的(如: 红宝石和蓝宝石), 96%的除法题所涉及的客体之间关系都是功能相关的(如: 宝石和盒子)。

语义一致现象反映了人在真实情境中整合数学运算知识和客体概念知识的机制。数学认知的目的是为了建构目标客体的关系模型, 使之符合于人的世界知识。各种客体关系约束了数学认知的计

划、证明和表达(English & Halford, 1995; Hegarty, Mayer, & Monk, 1995; Koedinger & Nathan, 2004)。当数学知识和世界知识矛盾时, 人在数学认知中会出现各种系统性的错误(Bassok et al., 1995)。这些错误显示了人类整合数学认知系统和语义系统的强烈倾向(Corte & Verschaffel, 1996)。

Bassok 等(1998)认为, 类比是人类整合数学认知系统和语义系统的认知机制。在问题解决中, 存在着类比迁移(Bassok, 2003)。类比(analogy)是发现事物的内在关系的一致性, 通过简单的、具体的事物去认知复杂的、抽象的事物(French, 2002)。隐喻和推理的研究表明, 类比是人类普遍的思维方式(Buehner & Cheng, 2005; Cathtrambone, 2002; Lakoff & Johnson, 1999; Leech, Mareschal, & Cooper, 2008; Spellman, Holyoak, & Morrison, 2001)。类别中的基本成员和上属概念与加法中的加数和和的关系具有一致性。对于类别的上属概念(如: 鲜花)而言, 无论基本成员(如: 雏菊和郁金香)的位置如何变换, 都不影响人们用一个上属概念去归纳它们。同样, 对于加法中的和而言, 无论加数的位置如何调换, 和保持不变(如: $a+b=b+a$)。功能相关的客体(如: 花瓶和雏菊)在语义网络中的位置不能互换(如: 雏菊和花瓶是包含关系, 只能花瓶包含雏菊, 不能相反)。同样, 在除法中, 除数和被除数的位置也不能调换($a/b \neq b/a$)。在类别中, 客体的关系对称; 在加法中, 加数的关系也对称。当碰到类别相关的客体时, 人们倾向于采用加法; 功能相关的客体的关系不对称, 除数和被除数的关系也不对称。当遇到功能关系时, 人们倾向于采用除法。类别关系和加法、功能关系和除法之间的类比整合可以自动地激活, 不需要经过复杂的认知操作, 而功能相关的客体却很难激活加法的知识。

既然数学认知系统和语义系统互相影响, 那么, 操纵客体之间的语义关系, 应该能够影响数学认知。研究者利用数字匹配任务来探讨这一问题。在数字匹配任务中, 以加号连接方式呈现启动数字对(如: 3+5), 在探测阶段再呈现一个数字, 要求被试判断该数字之前是否出现过。结果发现, 被试拒绝“和”数字(如: 8)的时间比拒绝中性数字(如: 9)的时间长(Bassok et al., 1998; LeFevre, & Kulak, 1994)。Bassok, Pedigo 和 Oskarsson (2008)把这种现象称为“和效应”。“和效应”揭示了在人类头脑中存在着一个类似语义网络的数字网络, 有数学联系的数字之间可以相互激活。“和效应”还表明, 加法运算是自

动激活的。Bassok 等(2008)发现, 数学运算受语义关系影响: 当启动词对的关系为类别相关(如: 玫瑰和雏菊)时, 拒绝“和”数字比拒绝中性数字的时间要长, 出现了“和效应”; 语义无关(如: 玫瑰和鼻子)或功能相关(如: 玫瑰和花瓶)的启动词对却未引发这一效应。这一研究结果得到了认知神经科学研究的支持。Fisher, Bassok 和 Osterhout (2010)以 N400 和 P600 为指标考察数学认知系统和语义系统的整合。N400 是探查语义违背的指标, P600 是句法加工的指标。被试加工类别一致的材料(如: “Twelve roses plus three daisies equals fifteen”)和类别不一致的材料(如: “Twelve cookies plus three jars equals fifteen”)。结果表明, 被试加工类别不一致的材料时, 出现了 P600 效应; 尽管最后一个数字在运算上正确, 被试在加工这一数字之后, 仍然出现了 N400。这表明, 被试将数学运算和语义加工进行类比是一种强烈的认知倾向。Simon 等(2002)发现, 大脑左侧的顶内沟损伤是造成各种认知损害同时发生的原因。这一脑区的损伤会导致计算、词语加工(包括失写症)、手指运动与计数以及空间定位能力的同时损害。这一发现为数学认知系统和语言系统在大脑功能上具有重合区提供了有力的证据。

然而, 已有的研究都产生于英文化背景, 缺乏在其他文化背景之下的证据。数学认知是一种具有文化特异性的认知活动, 在不同文化背景之下生活的人具有不同的表现形式(Campbell & Xue, 2001; 刘东台, 李小建, 2006; Pan, Gauvain, Liu, & Cheng, 2006; Tang et al., 2006; 魏勇刚, 庞丽娟, 李琳, 2009)。研究表明, 中国人的数学认知能力优于美国人 (Chen & Stevenson, 1995; Penner-Wilger, Leth-Steensen, & LeFevre, 2002; Siegler & Mu, 2008; Stevenson, Chen, & Lee, 1993; Varol & Farran, 2007)。那么, 在英文被试身上发现的语义关系影响“和效应”的现象能否推广到中文被试身上? 还需要探讨。“和效应”的产生机制也有待于进一步探索。Bassok 等(2008)认为, “和效应”源自于数学认知系统和语义系统的类比一致性。他们通过操纵类别关系启动加数观察到了“和效应”。但是, 仅有这一证明还显得不够, “和效应”还需要有更多的经验事实来支持: (1)如果“和效应”是人类的一种强烈的认知倾向, 那么, 操纵类别的上属概念(如: 鲜花)启动加法运算, 应该能够观察到更为显著的“和效应”; (2)如果“和效应”真的是由语义知识和加法知识的结构相似引起的类比映射, 那么, 由不同层级的词

汇(上属概念和基本概念, 如: 鲜花-雏菊)构成的词对将会阻碍“和效应”产生; (3)如果“和效应”的确是源于数学认知系统和语义系统的整合, 那么, 影响语义加工的因素也应该会影响“和效应”。典型性(typicality)是影响类别加工的重要变量(张积家, 董昌锋, 2006)。因此, 基本水平概念的典型性的一致性也应该会影响“和效应”的大小。如果上述推论均能够得到证实, 那么, “和效应”及其类比机制就有了更为坚实的基础。

2 实验 1 类别一致性对“和效应”的影响

Campbell 和 Xue (2001)发现, 中国内地学生完成复杂运算的成绩远高于在加拿大学习的中国学生和非亚裔学生, 两类中国学生完成简单运算时的成绩差异不显著, 但均优于非亚裔学生。Imbo 和 Lefevre (2009)发现, 中国留学生、加拿大学生和比利时学生在复杂加法运算方面差异显著。Tang 等(2006)发现, 中、英文被试在完成数学运算时使用的脑区不同。中、英文被试的思维方式亦不相同, 前者注重形象思维, 注重综合, 后者注重逻辑思维, 注重分析(刘晓燕, 2008; 马登龙, 张曦, 马晓理, 2010)。这些思维差异会导致不同文化中的人对事物的认知不同。因此, 类别关系能否在中国被试身上产生“和效应”, 值得探讨。

在本研究中, “和效应”的操作定义是: 和效应 $[T(s)]$ 等于某种条件下拒绝“和”目标数字的反应时 $[t(s)]$ 减去拒绝中性目标的反应时 $[t(n)]$, 即: $T(s) = t(s) - t(n)$ 。

出于实验 2 要考察的问题的需要, 实验 1 在 Bassok 等(2008)的语义启动数字匹配任务的基础上进行了修正。Bassok 等在探测阶段先判断数字匹配再判断文字匹配, 实验 1 先判断文字匹配再判断数字匹配。如果“和效应”能够推广到中国学生身上, 在类别一致条件下应该观察到显著的“和效应”; 在类别不一致条件下, 将不会出现“和效应”。

2.1 方法

2.1.1 被试 29 名研究生和本科生, 平均年龄 23 岁, 男生 11 名, 女生 18 名。视力或矫正视力正常。

2.1.2 设计 2 (类别: 一致/不一致) $\times$ 2 (目标数字: “和”目标/中性目标)被试内设计。因变量为被试的反应时和错误率。

2.1.3 材料 文字材料和数字材料各 48 组。每一试次都由启动词对(如: 玫瑰-菊花)、启动数字对

(如：3+5)、目标探测词(如：玫瑰)和目标探测数字(如：8)组成。

文字材料：从人们熟悉的类别中(鲜花、衣物、食品、水果等)选取 150 个基本水平概念，均为中文双字具体名词。30 名大学本科生对词汇的熟悉性和具体性做 5 点评分，“1”代表最熟悉或最具体，“5”代表最不熟悉或最抽象。计算每个词汇的熟悉性和具体性的平均分，从中选出 48 组符合要求的材料。48 组材料由启动词对和目标探测词组成，24 组类别一致的启动词对(如：玫瑰-茉莉)；24 组类别不一致的启动词对(如：玫瑰-白云)。类别一致的启动词和类别不一致的启动词的具体性、熟悉性及笔画数见表 1。统计检验表明，类别一致的启动词和类别不一致的启动词在具体性 $[t(94)=0.119, p>0.05]$ 、熟悉性 $[t(94)=0.09, p>0.05]$ 和笔画数 $[t(94)=1.196, p>0.05]$ 上的平均分均无显著的差异。

表 1 启动词的各种属性的平均分

材料属性	具体性	熟悉性	笔画数
类别一致	1.50(0.52)	1.80(0.71)	16.27(3.80)
类别不一致	1.48(0.46)	1.79(0.68)	15.29(4.12)

为了平衡目标探测词的反应比例，半数目标探测词和启动词对匹配(类别一致和类别不一致各 12 组)，正确反应为“Yes”；半数目标探测词和启动词对不匹配(类别一致和类别不一致各 12 组)，正确反应为“No”。在反应为“Yes”的项目中，半数材料是目标探测词和左边的启动词匹配，半数材料是目标探测词和右边的启动词匹配。

数字材料：48 组数字材料选自 Lefevre 和 Kulak

(1994)使用过的数字匹配任务的标准刺激。每组数字由一对启动数字对和一个目标探测数字组成。启动数字对的形式为 $m+n$ ($m>1, n>1, m\neq n$)。半数数字材料的目标探测数字和启动数字对中的一个启动数字匹配，称为匹配组，半数数字材料的目标探测数字和任何一个启动数字都不匹配，称为不匹配组。在匹配组中，半数目标探测数字和左边的启动数字匹配，半数目标探测数字和右边的启动数字匹配。只有非匹配组的数字材料用来测量“和效应”。根据目标探测数字与启动数字对之和的关系，目标探测数字分为“和”目标数字与中性目标数字，各有 12 组。非匹配组数字材料的目标探测数字选自 5~9 的数字系列。为了避免被试在特定数字和特定反应之间建立联系，12 个匹配组的数字材料为启动数字控制材料，即启动数字对和非匹配组数字材料中的启动数字对一致；另外 12 组的数字材料作为目标探测数字的控制材料，即目标探测数字和非匹配组的数字材料的目标探测数字一致。

24 组类别一致的文字材料和 24 组匹配组的数字材料随机组合；24 组类别不一致的文字材料和 24 组非匹配组的数字材料随机组合。同理，24 组类别一致的文字材料和 24 组非匹配组的数字材料随机组合，24 组类别不一致的文字材料和 24 组匹配组的数字材料随机组合。每组文字材料和数字材料在实验中都重复使用一次(材料举例见表 2)。通过编排文字材料和数字材料，任意两组的实验材料均不完全一样。各种反应组合也得到了平衡。实验后的访谈表明，被试并未觉得反应存在着某种固定的规律。

表 2 实验 1 的材料举例

启动数字对		启动词对		目标探测数字	
		类别一致	类别不一致	“和”目标数字	中性目标数字
3	5	玫瑰 茉莉	玫瑰 牙齿	8	4

2.1.4 仪器 装有 E-PRIME 的联想台式计算机，屏幕刷新频率为 60Hz。

2.1.5 程序 分为练习和正式实验两个阶段。练习阶段的程序是：首先在计算机屏幕的中央呈现红色“*”注视点，要求被试做好准备后按空格键，注视点消失，同时在距离屏幕两侧 35%和纵轴 50%处呈现两个名词，时间持续 480 ms，然后在名词的上方呈现两个启动数字和一个“+”号，时间为 135 ms。被试认真学习和记住这些名词和数字。接着是目标探测界面，首先是名词目标探测，在屏幕中央用红

色呈现一个名词，要求判断这个名词是否在呈现阶段出现过，出现过按“Yes”键，未出现过按“No”键，目标名词在按键后消失或在 3000 ms 后自动消失，接着出现反馈界面，持续 1000 ms，告知被试反应的结果和时间。然后是数字目标探测，在屏幕中央用红色呈现一个数字，要求被试判断，出现过按“Yes”键，未出现过按“No”键，目标数字按键后消失或者 3000 ms 后消失，接着出现反馈界面，持续 1000 ms，告知被试反应的结果和时间，然后进入新一轮实验。按键方式在被试间平衡，半数被试按

F 键为“*Yes*”反应,按 J 键为“*No*”反应,半数被试的按键设置相反。在实验前,在计算机键盘的 F 键和 J 键上贴上“*Yes*”和“*No*”的标签。

在实验开始前,主试宣读指导语。被试进行练习,主试在一旁监督,确定被试能够正确完成实验之后离开。为了让被试认真地加工启动词对,告知被试在实验结束后有一个纸笔测验,考察被试对实验中呈现名词的记忆,但在实验结束后,测验并未进行。正式实验的流程和练习阶段基本一样,所不同的是在目标探测阶段,每次判断后不再反馈,而

是以 1000 ms 的空屏代替反馈界面。在练习阶段有 10 个试次,正式实验有 96 个试次。实验前告知被试,在实验中如感到疲惫,当出现红色“*”注视点时可以休息,休息好后,按空格键继续实验。

2.2 结果与分析

剔除在 4 种条件下文字探测目标的正确率低于 75% 的被试 4 名,剔除反应时为 $M \pm 2.5SD$ 以外的数据;“和效应”的反应时统计只采用文字目标探测和数字目标探测都正确的项目。结果见表 3 和图 1。

表 3 实验 1 四种条件下被试的平均反应时和平均错误率($n=25$)

反应	类别一致		类别不一致	
	“和”目标数字	中性目标数字	“和”目标数字	中性目标数字
反应时(ms)	679 $\pm$ 115	632 $\pm$ 87	666 $\pm$ 109	665 $\pm$ 118
错误率(%)	6.20 $\pm$ 2.30	3.00 $\pm$ 1.60	5.80 $\pm$ 2.50	4.60 $\pm$ 2.90

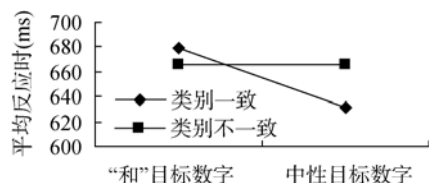


图 1 4 种条件下被试的平均反应时($n=25$)

反应时的方差分析表明,数字目标类型的主效应显著, $F(1, 24)=7.70$, $p<0.05$ 。“和”目标数字的反应时显著长于中性目标数字。数字目标类型与类别一致性的交互作用显著, $F(1, 24)=6.90$, $p<0.05$ 。简单效应分析表明,在类别一致条件下,“和效应”显著, $p<0.01$, 大小为 47 ms;在类别不一致条件下,“和效应”不显著, $p>0.05$ 。从图 1 可见,在类别一致条件下,中性目标数字的反应时最短,“和”目标数字的反应时最长。在类别一致条件下,“和”目标数字的反应时比类别不一致条件下长 13 ms,但差异不显著, $p>0.05$;中性目标数字的反应时比类别不一致条件下短 33 ms,差异显著, $p<0.05$ 。这种反应模式表明,与类别不一致条件比,在类别一致条件下观察到的“和效应”一部分来自于对“和”目标数字的激活,但更主要的是来自于对中性目标数字的抑制。错误率的方差分析表明,只有数字目标类型的主效应边缘显著, $F(1, 24)=3.98$, $p=0.057$ 。“和”目标数字的错误率比中性目标数字显著高。

2.3 讨论

实验 1 操纵类别一致的词对和类别不一致的词对启动加数,考察类别一致性对“和效应”的影响,

发现类别一致条件启动了显著的“和效应”:首先,在类别一致条件下,“和”目标数字反应时最长,错误率最高,表明类别一致的启动词对能够较好地激活“和”目标数字,导致拒绝“和”目标数字的困难增大;其次,在类别一致条件下,对中性目标数字的反应时最短,错误率最低,表明中性目标数字受到了较强的抑制,与“和”目标数字比,拒绝中性目标数字难度较小。其次,在类别不一致条件下,“和”目标数字与中性目标数字无论在反应时上还是在错误率上都没有出现显著差异,这一结果与经典的数字匹配任务(无语义启动)的结果有很大差异。在经典数字匹配任务中,与中性目标数字比,“和”目标数字能够引发更多的错误(LeFevre & Kulak, 1994)。而实验 1 却表明,类别不一致条件不适合加法运算,阻碍其自动激活,“和”目标数字和中性目标数字的匹配难度差异不显著。实验 1 还发现,类别一致条件和类别不一致条件的“和”目标数字的反应时差为 13 ms,中性目标数字的反应时差为 33 ms,表明在类别一致条件下观察到的“和效应”部分地源自于对“和”目标数字的激活,但更多的是源自于对中性目标数字的抑制。当然,也有其他的可能:与类别不一致条件比,在类别一致条件下记忆和再认词汇的难度以及对认知资源的运用不一样。由于在数字再判断之前有词语判断的环节,可能使数字判断环节的反应时基线出现差异。这种可能性将在后续的实验中考察。

尽管许多研究发现数学认知具有文化差异,但实验 1 却表明,就加法知识和类别语义的整合而言,

中美两国的被试表现十分相似。实验 1 亦说明, 修改后的实验任务能够有效地考察加法运算和语义概念的整合过程, 但结果与经典的“和效应”有不同, “和效应”主要源自于对中性目标数字的抑制。

3 实验 2 “和”位置上的上属概念启动对“和效应”的影响

类比思维是人类整合数学认知和语义加工的机制(Bassok et al., 2008)。根据加法和类别语义的类比关系, 类别成员与加数对应, 上属概念与“和”映射。已有的研究(Bassok et al., 2008)仅在与加数对应的位置上操纵语义关系考察对“和效应”的影响, 未在与“和”对应的位置上操纵语义关系。为了寻求语义关系类比映射影响加法运算的更多证据, 实验 2 将在与“和”对应的位置上操纵语义关系, 考察不同的语义关系对“和效应”的影响。实验预期是: 在目标探测词中呈现上属概念, 会增大“和”目标数字的激活, 导致与同位概念相比, 激活更大的“和效应”。

3.1.1 被试 39 名研究生和本科生, 平均年龄 23 岁, 男生 16 名, 女生 26 名。视力或矫正视力正常。

3.1.2 设计 2 (目标探测词类型: 上属概念 vs. 同位概念) $\times$ 2 (目标探测数字类型: “和”目标 vs. 中性目标) 被试内设计。因变量为被试的反应时和错误率。

3.1.3 材料 48 组材料用于测量“和效应”。探测目标文字分为上属概念和同位概念两类, 每类 24 组。两种材料的启动词对一样, 均选自实验 1 中 24 对类别一致的启动词对。在上属概念中, 目标探测

词是启动词对的上属概念(如: 启动词对为“茉莉-玫瑰”; 探测词为“鲜花”); 在同位概念中, 目标探测词是启动词对的同位概念(如: 启动词对为“茉莉-玫瑰”; 探测词为“菊花”)。统计检验表明, 上属概念和同位概念在具体性 [$t(94)=0.08, p>0.05$]、熟悉性 [$t(94)=0.12, p>0.05$] 和笔画数 [$t(94)=0.96, p>0.05$] 上的平均分数均无显著差异。

设置了 72 组填充材料。根据探测词分为两类: 上属概念和同位概念, 各有 36 组。上属概念的填充材料又分为 2 个子类: (1) 启动词对由一个基本水平概念和一个上属概念构成, 探测词为上属概念(如: 启动词对为“玫瑰-鲜花”; 探测词为“鲜花”), 共有 24 组; (2) 启动词对由两个基本水平概念构成, 探测词为上属概念(如: 启动词对为“耳朵-鼻子”; 探测词为“器官”), 共有 12 组。同位概念的填充材料亦分为 2 个子类: (1) 启动词对由同类别的基本水平概念组成, 探测词为基本水平概念(如: 启动词对为“围巾-袜子”; 探测词为“袜子”), 共有 12 组; (2) 启动词对由不同类别的基本水平概念组成, 探测词为基本水平概念(如: 启动词对为“玫瑰-白云”; 探测词为“剪刀”), 共有 24 组。数字材料和实验 1 相同。材料举例见表 4。

3.1.4 程序 与实验 1 相同。

3.2 结果与分析

2 名被试的数据被剔除。剔除反应时在 $M \pm 2.5SD$ 以外的数据; “和效应”的反应时分析只采用文字目标探测和数字目标探测都正确的项目。结果见表 5 和图 2。

表 4 实验 2 的材料举例(启动词对均为同类别成员)

启动数字对/词对		目标探测词		目标探测数字	
		上属概念	同位概念	“和”目标数字	中性目标数字
3	5	鲜花	海棠	8	4
玫瑰	茉莉				

表 5 实验 2 四种条件下被试的平均反应时和错误率($n=37$)

项目	上位概念		同位概念	
	和目标数字	中性目标数字	和目标数字	中性目标数字
反应时(ms)	678 $\pm$ 109	628 $\pm$ 93	676 $\pm$ 95	654 $\pm$ 109
错误率(%)	2.88 $\pm$ 1.14	2.30 $\pm$ 1.02	4.00 $\pm$ 1.45	1.80 $\pm$ 0.97

反应时的方差分析表明, 目标探测数字类型的主效应非常显著, $F(1, 36)=14.72, p<0.01$ 。“和”目标数字的反应时显著长于中性目标数字, 二者相差 36 ms。目标探测词类型和目标探测数字类型的交

互作用不显著, $F(1, 36)=2.99, p>0.05$ 。但从图 2 中可见, 在上属概念条件下, “和”目标数字与中性目标数字的反应时差为 50 ms; 在同位概念条件下, “和”目标数字与中性目标数字的反应时差仅为 22 ms。在

两种条件下均引发了显著的“和效应”，但上属概念条件下的“和效应”更大， $t(36)=5.19, p<0.05$ 。这表明，与同位概念比，上属概念所引发的“和效应”主要源自于启动刺激对中性目标数字的抑制。错误率的方差分析发现，各种主效应及其交互作用均不显著， $p>0.05$ 。

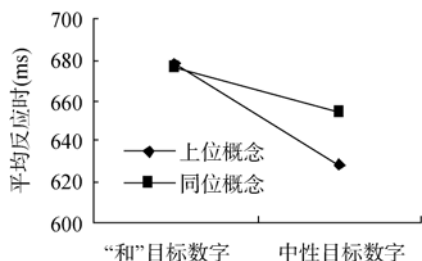


图2 4种条件下被试的平均反应时($n=37$)

3.3 讨论

实验2通过操纵与加法运算的“和”对应位置上的语义条件，考察不同语义条件(上属概念/同位概念)对“和效应”的影响，发现由于两类启动词对(上属概念/同位概念)均引发显著的“和效应”，但与同位概念相比，上属概念引发的“和效应”更大。Bassok等(2008)认为，类别语义关系促进加法运算激活，是因为类别语义关系和加法运算关系结构相似，通过类比映射机制发生影响。在两种关系映射中，基本水平概念对应于加数，上属概念对应于和。从图2可知，上属概念和同位概念并未引起“和”目标数字的反应时差异；但在两种条件下的中性目标数字的反应时却存在着显著的差异，中性目标数字的反应时在上属概念条件下显著短于在同位概念条件下。这表明，在上属概念条件下观察到了更大的“和效应”，并不是因为上属概念能够更好地激活“和”目标数字，而是因为它们能够更好地抑制中性目标数字。所以，与实验1类似，实验2的“和效应”的来源也有别于经典的“和效应”的来源。

Bassok等(1998)认为，类别语义关系通过类比映射影响加法运算是有条件的，即用于启动的语义关系必须对等。因此，实验3将考察上、下位概念对“和效应”的影响，验证这种对等关系的必要性。

4 实验3 加法位置上关系不对等概念对“和效应”的抑制

根据加法运算和类别语义类比映射的观点，加法运算中各个加数的地位平等，同一类别的成员语

义关系也对等，这是两者发生类比映射的基础(Bassok et al., 1998)。那么，当类别的语义关系不对等时，类比映射激活会受到阻碍吗？实验3将操纵加法位置上启动词对的语义关系(对等/不对等)，来考察“和效应”激活的类比映射基础的必要性。实验预期是：启动词对的语义关系不对等将阻碍“和效应”的产生。

4.1 方法

4.1.1 被试 29名研究生和本科生，平均年龄23岁，男生9名，女生23名，视力或矫正视力正常。

4.1.2 设计 2(启动词类型：语义关系不对等词对 vs. 语义关系对等词对) $\times$ 2(目标探测数字类型：“和”目标 vs. 中性目标)被试内设计，因变量为被试的反应时和错误率。

4.1.3 材料 48组文字材料用以测量“和效应”。根据启动词对中两个词的语义关系，分为语义关系不对等的材料和语义关系对等的材料，各有24组。语义关系不对等的材料的启动词对由一个上属概念和它的一个基本水平概念组成，12组的目标探测词为上属概念(如：启动词对为“鲜花-玫瑰”，探测词为“鲜花”)，12组的目标探测词为基本水平概念(如：启动词对为“鲜花-玫瑰”，探测词为“玫瑰”)。语义关系对等的材料的启动词对由两个属于同一类别的基本水平概念组成，探测词为基本水平概念(如：启动词对为“玫瑰-茉莉”，探测目标为“菊花”)。基本水平概念选自实验1的材料。统计检验表明，语义关系对等的材料和语义关系不对等的材料在具体性[$t(94)=0.81, p>0.05$]、熟悉性[$t(94)=0.32, p>0.05$]和笔画数[$t(94)=0.66, p>0.05$]上的平均分数均无显著差异。

72组填充材料根据启动词对和探测目标是否含有上属概念，分为上属概念材料和同位概念材料。上属概念材料包括：(1)反应匹配的材料：启动词对由一个基本水平概念和一个上属概念构成，探测词为相应的上属概念(如：启动词对为“玫瑰-鲜花”；探测词为“鲜花”)，共有12组。半数材料的上属概念呈现在启动词对的左边，半数材料的上属概念呈现在启动词对的右边，被试要做“肯定”反应；(2)反应不匹配的同类别材料：启动词对由两个基本水平概念构成，探测词为对应的上属概念(如：启动词为“耳朵-鼻子”；探测词为“器官”)，共有12组，被试要做“否”反应；(3)反应不匹配的异类别材料：启动词对由一个上属概念和一个不同类别的基本水平概念组成，探测词为与任何一个启动词都不同

类别的基本水平概念(如: 启动词对为“动物-玫瑰”, 探测词为“钻石”), 共有 6 组。同位概念的材料也分为 3 类: (1)反应匹配的同类别材料: 启动词对由同类别的基本水平概念组成, 探测词为基本水平概念(如: 启动词为“围巾-袜子”; 探测词为“袜子”), 共有 12 组; (2)反应匹配的异类别材料: 启动词对由不同类别的基本水平概念组成, 探测词为其中一个类别的基本水平概念(如: 启动词为“玫瑰-白云”, 探测词为“白云”), 共有 12 组; (3)反应不匹配的异类别材料: 启动词对与反应匹配异类别的材料设计一致, 但探测词与两个启动词均不同, 被试做“否”反应, 共有 18 组。

数字材料与实验 1 相同。材料举例如表 6。

表 6 实验 3 的材料举例

启动数字对	启动词对				目标探测数字	
	语义关系对等的材料		语义关系不对等的材料		“和”目标数字	中性目标数字
3 5	玫瑰 茉莉		玫瑰 鲜花		8	4

表 7 实验 3 四种条件下被试的平均反应时和错误率($n=27$)

项目	语义关系不对等		语义关系对等	
	和目标数字	中性目标数字	和目标数字	中性目标数字
反应时(ms)	791±125	810±134	825±122	798±112
错误率(%)	4.30±1.07	3.00±1.12	1.80±0.53	1.20±0.21

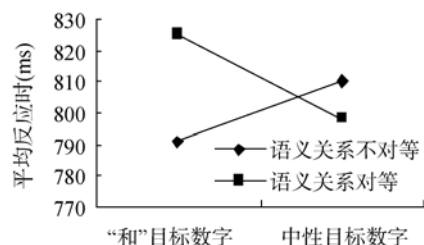


图 3 4 种条件下被试的平均反应时($n=27$)

反应时的方差分析发现, 启动词类型和目标探测数字的类型的交互作用显著, $F(1, 26) = 6.36, p < 0.05$ 。简单效应分析表明, 在语义关系不对等条件下, “和”目标数字的反应时比中性目标数字快 19 ms, 但不显著, $F(1, 26) = 1.49, p > 0.05$; 在语义关系对等条件下, “和”目标数字与中性目标数字的反应时差异边缘显著, $F(1, 26) = 3.80, p = 0.06$, 出现了典型的“和效应”, 大小为 27 ms。从图 3 可知, 反应时最长的为语义关系对等条件下的“和”目标数字, 反应时最短的为语义关系不对等条件下的“和”目标数字。语义关系对等条件下的“和”目标数字的反应时显著慢于语义关系不对等条件下的“和”目标数字,

4.1.4 设备 与实验 1 相同。

4.1.5 程序 为了避免探测词中的上属概念对实验处理带来的无关影响, 采用经典的语义启动数字匹配任务(Bassok et al., 1998), 即先判断数字匹配再判断文字匹配。每一试次都由启动词对(如: 玫瑰-菊花)、启动数字对(如: 3+5)、目标探测数字(如: 8)、目标探测词(如: 玫瑰)组成。每个被试需要完成 10 个试次的练习和 120 个试次的实验。

4.2 结果与分析

2 名被试的数据被剔除。剔除反应时在 $M \pm 2.5SD$ 以外的数据。“和效应”的反应时统计只采用文字目标探测和数字目标探测都正确的项目。结果见表 7 和图 3。

$t(26) = 2.29, p < 0.05$; 语义关系对等条件下和语义关系不对等的条件下中性目标数字的反应时差异不显著, $t(26) = 0.85, p > 0.05$ 。错误率的方差分析发现, 启动词类型的主效应显著, $F(1, 26) = 4.47, p < 0.05$, 语义关系不对等条件下的错误率显著高于语义关系对等条件下。

4.3 讨论

实验 3 使用语义关系对等和语义关系不对等的词对启动加法运算。结果发现, 语义关系对等的词对启动了显著的“和效应”; 语义关系不对等的词对未启动显著的“和效应”。Bassok 等(1995)认为, 类别语义关系和加法运算所以能够发生影响, 就在于它们的结构特征和表面特征的相似性。结构特征的相似性是指加数与基本水平概念、和与上属概念的对应关系, 表面特征的相似性是指类别语义关系和加法运算均存在关系上的对等, 这是类别关系和加法运算产生类比映射的必要条件。在实验 3 中, 同位概念的启动词对均为同类别的基本水平概念, 语义关系对等, 满足了与加法运算表面特征相似的要求, 语义情境激活了“和效应”; 语义关系不对等的

词对并未满足类别语义关系和加法运算之间的相似性要求,语义情境阻碍了“和效应”的产生。此外,结合实验2和实验3的结果可知,类别关系和加法运算的类比映射存在严格的一一对应,具有明确的方向性。“和”对应位置上的上属概念启动加法运算(实验2),加法位置上的上属概念抑制加法运算(实验3)。实验3还表明,语义关系对等的词对能够更好地激活“和”目标数字,因此,在语义关系对等条件下观察到经典的“和效应”;与之相反,语义关系不对等词对抑制了“和”目标数字的激活,在语义关系不对等条件下,“和”目标数字的反应时显著加快,导致语义关系不对等条件下“和”目标数字的反应时与中性目标数字的反应时差异不显著(图3)。

实验1、实验2和实验3的结果表明,加法运算和类别关系具有相似的结构,类别关系通过类比映射影响加法运算。这种影响稳定且强烈。那么,影响类别加工的因素是否也影响加法运算?实验4将考察类别成员的典型性的一致性对加法运算的影响。

5 实验4 类别成员的典型性的一致性对“和效应”的影响

典型性(typicality)是影响类别加工的重要因素。研究表明,归类速度取决于类别成员的典型性,典型性越高,归类就越快(刘丽红,王才康,莫雷,1998)。启动词对的典型性的一致性也体现了材料的对等性。根据加法运算和类别关系的类比映射理论,这种一致性会影响“和效应”的大小。此外,虽然实验1和实验2均发现了“和效应”,但与Bassok等(1998)发现的“和效应”不完全相同。“和效应”主要源自于对“和”目标数字的激活还是源自于对中性目标数字的抑制?实验4将使用经典的数字匹配任务(Bassok et al., 1998)对这一问题做进一步的探讨。

5.1 方法

5.1.1 被试 42名研究生和本科生,平均年龄23岁,男生15名,女生28名,视力或矫正视力正常。

5.1.2 设计 2(启动词对的典型性一致性:一致vs.不一致)×2(目标探测数字类型:“和”目标数字vs.中性目标数字)被试内设计。因变量为被试的反应时和错误率。

5.1.3 材料 从蔬菜、水果、动物、鸟类、餐具、器官、文具和乐器等类别中选择162个成员,名称均为汉语双字名词。30名本科生和研究生对实验材料进行7点评定,统计每个类别成员的平均熟悉性和平均典型性,选取符合要求的文字材料。最终获得实验材料和填充材料各48组。每组材料的成分与实验1相同,包含启动词对、启动数字对、目标探测词和目标探测数字。

启动词对和目标探测词均属于同一类别的成员。根据启动词对的典型性关系分为一致和不一致两类,各有24组。在典型性一致的材料中,启动词1和启动词2的典型性差异不显著($M_1=6.53$, $M_2=6.50$), $t(46)=0.44$, $p>0.05$ 。在典型性不一致的材料中,启动词1和启动词2的典型性差异显著($M_1=6.51$, $M_2=5.20$), $t(46)=10.44$, $p<0.01$ 。典型性一致的材料和典型性不一致的材料平均熟悉性差异不显著($M_1=6.36$, $M_2=6.40$), $t(94)=0.421$, $p>0.05$; 平均笔画数差异不显著($M_1=19.25$, $M_2=20.56$), $t(94)=-1.17$, $p>0.05$ 。数字材料与实验1相同。实验材料的举例见表8。

5.1.4 程序 和实验3相同。先判断数字匹配,再判断文字匹配。

5.2 结果与分析

2名被试的数据被剔除。剔除反应时在 $M\pm 2.5SD$ 以外的数据。“和效应”的反应时统计只采用文字目标探测和数字目标探测都正确的项目。结果见表9和图4。

表8 实验4的材料举例

启动数字对		启动词对		目标探测数字	
		典型性一致	典型性不一致	“和”目标数字	中性目标数字
3	5	麻雀 乌鸦	麻雀 企鹅	8	4

表9 实验4四种条件下被试的平均反应时和错误率($n=40$)

项目	典型性一致		典型性不一致	
	和目标数字	中性目标数字	和目标数字	中性目标数字
反应时(ms)	923±183	865±181	898±162	873±163
错误率(%)	3.96±0.56	3.58±0.82	4.35±0.63	4.62±0.56

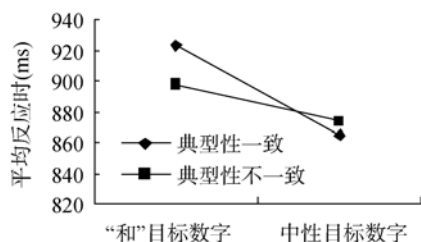


图4 4种条件下被试的平均反应时(n=40)

反应时的方差分析发现, 目标探测数字类型的主效应极其显著, $F(1, 39)=22.88, p<0.01$ 。“和”目标数字的反应时显著长于中性目标数字, 二者相差 41 ms。启动词对的典型性一致性和目标探测数字类型的交互作用边缘显著, $F(1, 39)=3.28, p=0.07$ 。简单效应分析表明, 当启动词对的典型性一致时, “和效应”极其显著, $F(1, 39)=19.62, p<0.01$ 。“和”目标数字的反应时显著长于中性目标数字, 二者相差 58 ms; 当启动词对的典型性不一致时, “和效应”边缘显著, $F(1, 39)=1.93, p=0.06$ 。“和”目标数字的反应时长于中性目标数字, 二者相差 24 ms。与启动词对的典型性不一致的条件比, 启动词对的典型性一致条件的“和效应”更加显著, 二者相差 34 ms, $p<0.05$ 。从图 4 可知, 反应时最长的为启动词对典型性一致条件下的“和”目标数字, 反应时最短的为启动词对典型性一致条件下的中性目标数字。启动词对典型性一致条件下“和”目标数字的反应时长于启动词对典型性不一致条件下(二者差异达 25 ms), 但不显著, $p>0.05$ 。启动词对典型性一致条件和典型性不一致条件下对中性目标数字的反应时差异不显著。这种反应模式表明, 两种条件下对中性目标数字的抑制水平相当, 启动词对典型性一致条件下所以出现更大的“和效应”, 是因为与启动词对典型性不一致的条件比, 更能够激活“和”目标数字。错误率的方差分析发现, 各种主效应和交互作用都不显著, $p>0.05$ 。

5.3 讨论

实验 4 通过操纵启动词对的典型性一致性水平, 考察了启动词对的典型性一致性对“和效应”的影响。结果发现, 典型性一致的启动词对和典型性不一致的启动词对均能够启动“和效应”, 但前者的“和效应”的量大于后者。比较 4 种条件下的反应时可知, 典型性一致的启动词对和典型性不一致的启动词对对于中性目标数字的抑制水平相当, 典型性一致条件下所以出现了更大的“和效应”, 主要得益于它更能够激活“和”目标数字。这表明, 词对的典

型性一致性影响加法运算的激活。研究表明, 对由两个高典型成员(如: 麻雀-乌鸦)组成的词对, 归类(如: 鸟类)速度快于一个是高典型成员、另一个是低典型成员(如: 麻雀-母鸡)的词对。这种归类优势可以加速加法运算的激活, 引发更大的“和效应”。因此, 实验 4 表明, 即使在适合的语义情境中, 由于适合程度不同, 对加法运算的启动也有差异, 说明影响语义加工的因素同样影响数学认知, 预示着数学认知系统和语义系统之间联系非常紧密。实验 4 亦说明, 经典范式下的“和效应”的确源自于对“和”目标数字的激活。

6 综合讨论

6.1 数学知识和语义知识一致是人类的一种强烈的认知倾向

人类运用数学运算知识目的是为了建构目标客体的关系模型。因此, 各种客体关系约束了数学运算的计划、证明和表达(English & Halford, 1995; Hegarty et al., 1995; Koedinger & Nathan, 2004)。研究发现, 正确解决数学文字问题有赖于 5 种能力: (1)情境理解; (2)问题表征; (3)问题归类; (4)解题计划; (5)自我评价。其中, 情境理解和问题表征的能力尤为重要(Lueangeli, Tressoldi, & Cendron, 1998), 是完成高认知水平数学任务的必要条件(鲍建生, 周超, 2010)。情境理解主要是建构目标情境中客体的语义关系, 问题表征是把语义关系转换成数量关系表征, 并用数学语言来表达。可见, 数学文字问题解决实质上是数量关系和语义关系整合的过程。这种长期的整合训练形成了人类在数学认知中寻求数学知识和语义系统一致的倾向, 导致语义系统影响数学认知。本研究的结果不仅支持了数学运算和语义知识一致的加工倾向的存在, 更为这种加工倾向提供了新的证据。研究发现, “和效应”在适合的语义情境中得到了激活(实验 1 和实验 2), 在不适合的语义情境中受到了阻碍(实验 3), “和效应”的大小受类别成员的典型性的一致性影响(实验 4)。因此, 虽然数学认知具有文化特异性, 但语义系统对于数学认知的约束是强有力的, 数学运算的确受合适的语义情境影响, 符合类比映射的理论。

神经元复用理论(neuronal recycling theory)认为, 人类的数学认知依赖于头脑中预存的神经回路, 其结构主要受制于遗传因素, 也具有一定的可变性。神经回路在文化环境中可以复用, 预存的神经回路也可以根据环境的需要微调, 以满足实用的需

要(Dehaene, Piazz, Pinel, & Cohen, 2003)。文化差异既可以导致人们在数学认知上的差异,文化中的共同成分也会塑造人们在数学认知上的相似表现。本研究 and Bassok 等(1998)的实验均以大学生为被试,他们从小接受数学文字问题解决训练。他们在数学运算和语义情境整合时具有一致性可能源于相似的训练经验。

6.2 类比映射机制——数学认知和语义概念整合的基础

类比思维是人类常用的思维方式,在推理、问题解决、隐喻理解、语言加工等领域起重要作用。计算模型认为,类比推理的归纳力度直接基于两个类比物之间的相似性。计算模型包括:(1)相似性理论。认为源类比物和目标类比物越相似,类比推理的归纳力度越强;(2)结构映射理论。认为类比物之间匹配的高水平关系越多,类比推理的归纳力度越强;(3)ACME (Analogical Constraint Mapping Engine)模型。认为类比受三种限制:同构性、语义相似性和实用性(高淑芬,邱美虹,1998)。类比推理包括若干独立的心理过程(如表征、检索、迁移、评估和学习),结构相似性或系统性在类比中扮演重要的角色(任宗浩,2002);(4)LISA (Learning and Inference with Schemas and Analogies)模型。认为类比物之间的关系相似会影响问题解决历程(陈茹玲,苏宜芬,2005)。大量研究支持计算模型。根据计算模型,数学认知和语义概念所以能够相互影响,是因为两个系统在表面特征或结构特征上具有许多相似之处。首先,数学知识和语义知识存在着相似的网状表征结构。数字网络的结构和作用机制与语义网络相似(Ashcraft, 1992; Campbell, 1995)。就加法运算和类别关系而言,两者在结构表征上相似,在本质上相通。在研究加减法文字问题解决时,研究者发现“部总知识”起着至关重要的作用(周新林,张梅玲,2003)。部总知识是部分和总体之间关系的知识。加法运算知识可以理解为“部分+部分=总体”。类别归类知识也可理解为“部分+部分=总体”。因此,加法知识和类别归类知识在本质上是相通的。

加法运算和类别语义在表征结构上也相似(Bassok et al., 2008)。类别成员和加数对应,上属概念与和对对应。加法运算和类别关系的表面特征也相似。在加法中,加数的地位相等,位置调换不会影响加法运算的结果。在类别归类中,类别成员的语义关系对等,位置调换也不影响归类的结果,而且

能够激活“和效应”(实验 1);当在加数对应的位置上词的语义关系不对等时(实验 3),“和效应”受到阻碍。由于存在着 $a+b=b+a=s$ 的运算模式,在“和”目标位置上出现上属概念可以激发更大的“和效应”(实验 2)。总之,在本研究中,数学认知和语义知识的类比映射理论得到了进一步的证实。

6.3 自动激活加工并非是不受任何影响的加工

LeFevre 等(1994)认为,简单加法运算是自动激活的。Bassok 等(1998)指出,简单加法运算受情境调节,类别语义情境能够促进加法运算,功能语义情境阻碍加法运算。实验 1、实验 2 和实验 4 的结果亦支持这一观点。这与传统的自动激活的观点相矛盾,但与最新的研究结果(Bassok et al., 2008; Besner & Stolz, 1999; Mathis, 2002; Rusconi, Galfano, Speriani, & Umiltà, 2004;)一致。传统的观点认为,自动加工不受外在情境影响(Besner, Stolz, & Boutilier, 1997)。然而,来自字词识别加工(Besner & Stolz, 1999)、客体识别加工(Mathis, 2002)和认知计算加工(Bassok et al., 2008; Rusconi et al., 2004)的研究结果支持情境在自动加工中的调节效应。Besner 和 Stolz (1999)认为,字词的自动通达加工受情境调节。因此,与其将自动加工看成是不受任何外在影响的加工,不如将它看作是一种“缺省”的加工方式,即自动加工是一种没有外在影响时大脑默认的加工方式。当外在情境的强度达到一定程度时,自动加工将受其影响而发生改变。因此,加法运算亦是一种“缺省”的加工方式,不同强度的外在情境引发了不同程度的“缺省”(实验 1、实验 2 和实验 4)。

总之,本研究的结果进一步证实了在数学认知中人有整合数学知识和语义知识的内在倾向。数字网络通过类比映射机制与语义网络进行深度整合。数学认知是一个复杂的加工过程,涉及多个系统的协同作用。本研究的结果亦揭示了在文字题教学中建立关于问题情境的语义表征以及语义表征与数学运算的映射关系的重要性。在解答问题时,需要训练学生首先分析问题情境,然后用数学运算来表示问题情境,应该鼓励学生通过构造语义表征去解答数学问题。语义表征是以事实知识为基础的表征,不是以数学逻辑知识为基础的表征。应该避免数学知识教学和文字题教学的脱节。现在的加减法教学,往往是先让学生熟练掌握基本知识,再进行文字题教学。实际上,它们之间可以形成更为密切的关系。例如,在加减法教学中直接渗透文字题教学,或者

通过设置实际情境促进学生对加减法知识的理解，而不是单纯地强调数学运算知识的学习，强调计算的准确性和速度。

6.4 关于“和效应”的本质的讨论

和效应的本质是对“和”目标数字的激活还是对中性目标数字的抑制？本研究的结果表明，“和效应”的本质不仅包含对“和”目标数字的激活，还包含有对中性目标数字的抑制，激活或抑制受实验范式的影响。

在实验 2 中，同位概念条件与实验 1 中的类别一致条件的材料相同，以此作为基线比较可知，

“和”目标数字在各种条件下的反应时差异并不显著；中性目标数字的反应时却因为条件不同而存在着差异，在类别一致的上属概念条件下反应时最短，在类别一致的同位概念条件下反应时次之，在类别不一致条件下反应时最长(而且与同一条件下“和”目标数字的反应时差异不显著)。与之相对，在实验 4 中，“和”目标数字在不同条件下的反应时差异不显著，中性目标数字的反应时亦不受实验处理(条件 1 vs. 条件 2)影响。概而言之，虽然实验 1、实验 2 和实验 4 均显示了稳定的“和效应”，但“和效应”的来源却不相同(见表 10)。

表 10 实验 1~4“和”目标数字和中性目标数字在不同条件下的反应时及效应量(ms)

项 目	实验 1		实验 2		实验 4	
	“和”目标数字	中性目标数字	“和”目标数字	中性目标数字	“和”目标数字	中性目标数字
条件 1	679	632	678	628	923	865
条件 2	666	665	676	654	898	873
效应量	11	-33	2	-26	25	-8

注：在实验 1 中，条件 1 为类别一致，条件 2 为类别不一致；在实验 2 中，条件 1 为上属概念，条件 2 为同位概念；在实验 4 中，条件 1 为典型性一致，条件 2 为典型性不一致。

从实验范式上看，实验 1、实验 2 和实验 4 存在着区别。实验 1 考察在中文背景下是否存在“和效应”。由于实验 2 需要考察上属概念对“和效应”的影响，若采用经典匹配任务(在探测阶段先判断数字匹配再判断文字匹配)，上属概念的作用将无法体现。因此，实验 1 修正了经典匹配任务(在探测阶段先判断文字匹配再判断数字匹配)，并发现了在不同实验处理下对中性目标数字反应时的差异。在实验 4 中，采用经典的匹配任务，实验结果与实验 1、实验 2 存在着差别。这表明，任务范式对“和效应”具有重要影响。通过修正后的范式不仅说明了“和效应”的稳定性，更说明了对中性目标数字的抑制效果受实验处理的影响。

在人类的认知加工中，激活与抑制同时存在。Bjorklund 和 Harnishfeger (1990)的资源理论认为，抑制是对激活扩散的阻断。抑制能够有效地阻止与任务无关的信息进入工作记忆，从而更好地利用与任务相关的信息。Dempster (1993)指出，抑制影响认知成绩，是压抑效率的重要指标。个体如果在抑制上存在困难，在干扰敏感任务上会存在缺陷。因此，“和效应”的本质是在自动激活中激活了“和”目标数字，同时抑制了对中性目标数字的激活。无论是“和”目标数字还是中性目标数字，在呈现阶段都未出现过。因此，在数字匹配任务中，被试要同时

抑制住“和”目标数字和中性目标数字。但是，不同的实验程序会对中性目标数字的抑制产生不同的效果。在修正的实验范式中(实验 1 和实验 2)，在启动词对和启动数字对呈现之后，在完成对类别不一致探测词的匹配任务时，中性目标数字的拒绝难度明显增加，反应速度与拒绝“和”数字的速度接近。即在这一条件下的文字判断任务干扰了对中性目标数字的抑制；与之相对，在完成对类别一致的探测词(同位概念或上属概念)的匹配任务时，中性目标数字的拒绝难度降低。即在这一条件下的文字判断任务中，对中性目标数字的抑制干扰较少。可见，对启动词对的加工可以激活人脑中与之相关的概念(上属概念或类别一致概念)，使匹配任务和难度降低，降低拒绝中性目标数字的难度。而且，由表 10 可知，当探测词为上属概念时，对中性目标数字的拒绝反应时更短，即与同位概念相比，上属概念更容易被启动词对激活。在经典的实验范式中(实验 4)，在启动词对和启动数字对呈现之后，先判断数字匹配后判断文字匹配，由于缺少文字判断任务的干扰，中性目标数字亦容易抑制。因此，“和效应”的本质是对“和”目标数字的激活和对中性目标数字的抑制：对“和”目标数字的激活是自动的，不受文字任务的干扰，对中性目标数字的抑制会受到文字任务的干扰，因此，更可能是一种控制加工。这

是本研究对“和效应”理论的重要贡献。

7 结论

(1) 在人类的数学认知加工中, 数学知识和语义知识的整合是一种强烈的认知倾向。

(2) 人类通过类比映射的方式整合数学知识和语义知识。

(3) 语义系统对数学认知系统的影响非常强烈, 影响语义加工的因素同样影响数学认知。

参 考 文 献

- Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition*, 44, 75–106.
- Bao, J. S., & Zhou, C. (2010). Analysis of factors which affect the abilities of high lever mathematics cognition. *The Monthly Journal of High School Mathematics*, (9), 1–4.
- [鲍建生, 周超. (2010). 影响学生高层次数学认知能力的因素分析. *中学数学月刊*, (9), 1–4.]
- Bassok, M. (2001). Semantic alignments in mathematical word problems. In D. Gentner, K. J. Holyoak, & B. N. Kokinov (Eds.), *The analogical mind: Perspectives from cognitive science* (pp. 401–433). Cambridge, MA: MIT Press.
- Bassok, M. (2003). Analogical transfer in problem solving. In J. Davidson & R. J. Sternberger (Eds.), *The psychology of problem solving* (pp. 343–372). Cambridge; Cambridge University Press.
- Bassok, M., Chase, V. M., & Martin, S. A. (1998). Adding apples and oranges: Alignment of semantic and formal knowledge. *Cognitive Psychology*, 35, 99–134.
- Bassok, M., Pedigo, S. F., & Oskarsson, A. T. (2008). Priming addition facts with semantic relations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 343–352.
- Bassok, M., Wu, L. L., & Olseth, K. L. (1995). Judging a book by its cover: Interpretative effects of content on problem-solving transfer. *Memory & Cognition*, 23, 354–367.
- Besner, D., & Stolz, J. A. (1999). Context dependency in Stroop's paradigm: When are words treated as nonlinguistic objects? *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 53, 374–380.
- Besner, D., Stolz, J. A., & Boutilier, C. (1997). The Stroop effect and the myth of automaticity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, 221–225.
- Bjorklund, D. F., & Harnishfeger, K. K. (1990). The resources construct in cognitive development: Diverse sources of evidence and a theory of inefficient inhibition. *Developmental Review*, 10, 48–71.
- Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (1998). Ordering of the numerosities 1 to 9 by monkeys. *Science*, 282, 746–749.
- Buehner, M., & Cheng, P. W. (2005). Causal learning. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Eds.), *Cambridge handbook of thinking and reasoning* (pp. 143–168). Cambridge: Cambridge University Press.
- Campbell, J. I. D. (1995). Architectures for numerical cognition. *Cognition*, 53, 1–44.
- Campbell, J. I. D., & Xue, Q. L. (2001). Cognitive arithmetic across cultures. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 299–315.
- Cathtrambone, R. (2002). The effects of surface and structural feature matches on the access of story analogs. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 318–334.
- Chen, C., & Stevenson, H. W. (1995). Motivation and mathematics achievement: A comparative study of Asian-American, Caucasian-American, and East-Asian high school students. *Child Development*, 66, 1215–1234.
- Chen, J. L., & Su, Y. F. (2005). The effects of superficial and structure feature matches on the story reminding performance of students at different ages. *Bulletin of Educational Psychology*, 37, 123–146.
- [陈茹玲, 苏宜芬. (2005). 类比故事的表面特征与结构特征在不同年龄层对故事回想表现的影响. *教育心理学报*, 37, 123–146.]
- Corte, D. E., & Verschaffel, L. (1996). An empirical test of the impact of primitive intuitive models of operations on solving word problems with a multiplicative structure. *Learning and Instruction*, 6, 219–242.
- Cowan, N. (2002). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral & Brain Sciences*. 24(Special Issue), 87–185.
- Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 47–68.
- Dehaene, S. (2001). Précis of the number sense. *Mind and Language*, 16, 16–36.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33, 219–250.
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 218–224.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487–506.
- Dempster, F. N. (1993). Resistance to interference: Development changes in a basic processing mechanism. In C. J. Brainerd & M. Pressley (Eds.), *Basic processes in memory in memory development: Progress in cognitive development research* (pp. 3–27). New York: Springer-Verlag.
- English, L. D., & Halford, G. S. (1995). *Mathematics education: Models and processes*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Fisher, J. K., Bassok, M., & Osterhout, L. (2010). When two plus two does not equal four: Event-related potential responses to semantically incongruous arithmetic word problems. In B.G. Bara, L. Barsalou & M. Bucciarelli (Eds.), *Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (pp. 1571–1576). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- French, R. M. (2002). The computational modeling of analogy-making. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 200–205.
- Gao, S. F., & Qiu, M. H. (1998). Searching and mapping of analog. *Chinese Journal of Science Education*, 6, 63–80.
- [高淑芬, 邱美虹. (1998). 类比的检索与对应. *科学教育学报*, 6, 63–80.]
- Hegarty, M., Mayer, R. E., & Monk, C. A. (1995). Comprehension of arithmetic word problems: A comparison of successful and unsuccessful problem solvers. *Journal of Educational Psychology*, 87, 18–32.

- Hermelin, B., & O'Connor, N. (1990). Factors and primes: A specific numerical ability. *Psychological Medicine*, 20, 163–169.
- Imbo, N., & LeFevre, J. A. (2009). Cultural differences in complex addition: Efficient Chinese versus adaptive belgians and Canadians. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 1465–1476.
- Koedinger, K. R., & Nathan, M. J. (2004). The real story behind story problems: Effects of representations on quantitative reasoning. *Journal of the Learning Sciences*, 13, 129–164.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the flesh: The embodied mind and its challenge to western thought*. Chicago: Chicago University Press.
- Leech, R., Mareschal, D., & Cooper, P. R. (2008). Analogy as relational priming: A developmental and computational perspective on the origins of a complex cognitive skill. *Behavior and Brain Sciences*, 31, 357–414.
- LeFevre, J., & Kulak, A. G. (1994). Individual differences in the obligatory activation of addition facts. *Memory & Cognition*, 22, 188–200.
- Lian, S. Q., & Fang, Y. J. (2006). Dissociation of mathematics cognitive abilities and language cognitive abilities. *Journal of Mathematics Education*, 15, 22–24.
- [连四清, 方运加. (2006). 数学认知能力与语言认知能力的分离现象. *数学教育学报*, 15, 22–24.]
- Liu, D. T., & Li, X. J. (2006). New understanding on the relationship between language and numerical cognition. *Advances in Psychological Science*, 14, 654–664.
- [刘东台, 李新建. (2006). 语言与数量认知关系的新认识. *心理科学进展*, 14, 654–664.]
- Liu, L. H., Wang, C. K., & Mo, L. (1998). Review of theories of classify in cognitive psychology. *Psychological Science*, 21, 540–543.
- [刘丽红, 王才康, 莫雷. (1998). 认知心理学归类理论述评. *心理科学*, 21, 540–543.]
- Liu, X. Y. (2008). Different views of numbers caused by cultures of East and West. *Journal of Guangxi University (Philosophy and Social Science)*, 30, 274–275.
- [刘晓燕. (2008). 在中西方文化背景下不同的数字观. *广西大学学报 (哲学社会科学版)*, 30, 274–275.]
- Lueangeli, D., Tressoldi, P. E., & Cendron, M. (1998). Cognitive and metacognitive abilities involved in the solution of mathematical word problems: Validation of a comprehensive model. *Contemporary Educational Psychology*, 23, 257–275.
- Ma, D. L., Zhang, X., & Ma, X. L. (2010). Viewing differences between of Chinese and Western cultures. *Journal of Gansu Radio & TV University*, 20, 26–29.
- [马登龙, 张曦, 马晓理. (2010). 中西方文化背景下的思维差异. *甘肃广播电视大学学报*, 20, 26–29.]
- Martin, S. A., & Bassok, M. (2005). Effects of semantic cues on mathematical modeling: Evidence from word-problem solving and equation construction tasks. *Memory & Cognition*, 33, 471–478.
- Martini, L., Domahs, F., Benke, T., & Delazer, M. (2003). Everyday numerical abilities in Alzheimer's disease. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9, 871–878.
- Mathis, K. M. (2002). Semantic interference from objects both in and out of a scene context. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 171–182.
- Nan, Y., & Luo, Y. J. (2003). Cognitive neuroscience research status quo of number processing. *Advances in Psychological Science*, 11, 289–295.
- [南云, 罗跃嘉. (2003). 数字加工的认知神经基础. *心理科学进展*, 11, 289–295.]
- Nieder, A., Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 297, 1708–1711.
- Nunes, T., Schliemann, A. D., & Carraher, D. W. (1993). *Street mathematics and school mathematics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pan, Y. Q., Gauvain, M., Liu, Z. K., & Cheng L. (2006). American and Chinese parental involvement in young children's mathematics learning. *Cognitive Development*, 21, 17–35.
- Penner-Wilger, M., Leth-Steensen, C., & LeFevre J. A. (2002). Decomposing the problem-size effect: A comparison of response time distributions across cultures. *Memory & Cognition*, 30, 1160–1167.
- Pesenti, M., Thioux, M., Seron, X., & De Volder, A. (2000). Neuroanatomical substrates of Arabic number processing, numerical comparison, and simple addition: A PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 461–479.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44, 547–555.
- Ren, Z. H. (2002). Artificial intelligence in analogical thinking and its implications for science education. *Science Education Monthly*, 248, 2–15.
- [任宗浩. (2002). 类比思考人工智慧研究及其对于科学教育的意涵. *科学教育月刊*, 248, 2–15.]
- Rossor, M. N., Warrington, E. K., & Cipolotti, L. (1995). The isolation of calculation skills. *Journal of Neurology*, 242, 78–81.
- Rusconi, E., Galfano, G., Speriani, V., & Umiltà, C. (2004). Capacity and contextual constraints on product activation: Evidence from task-irrelevant fact retrieval. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 57A, 1485–1511.
- Siegler, R. S., & Mu, Y. (2008). Chinese children excel on novel mathematics problems even before elementary school. *Psychological Science*, 19, 759–763.
- Simon, O., Mangin, J. F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, 33, 475–487.
- Spellman, B. A., Holyoak, K. J., & Morrison, R. G. (2001). Analogical priming via semantic relations. *Memory & Cognition*, 29, 383–393.
- Stevenson, H. W., Chen, C. S., & Lee, S. Y. (1993). Mathematics achievement of Chinese, Japanese, and American children: Ten years later. *Science*, 259, 53–58.
- Sulkowski, G. M., & Hauser, M. D. (2001). Can rhesus monkeys spontaneously subtract. *Cognition*, 79, 239–262.
- Tang, Y. Y., Zhang, W. T., Chen, K. W., Feng, S. G., Ji, Y., Shen, J. X., et al. (2006). Arithmetic processing in the brain shaped by cultures. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 103, 10775–10780.
- Temple, C. M. (1991). Procedural dyscalculia and number fact dyscalculia: Double dissociation in developmental dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, 8, 155–176.

- Varol, F., & Farran, D. (2007). Elementary school students' mental computation proficiencies. *Early Childhood Education Journal*, 35, 89–94.
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of features, conjunctions, and objects in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 92–114.
- van Karskamp, N. J., & Cipolotti, L. (2001). Selective impairments for addition, subtraction and multiplication: Implications for the organisation of arithmetical facts. *Cortex*, 37, 363–388.
- Wei, Y. G., Pang, L. J., & Li, L. (2009). Mathematical culture and children's mathematical cognition. *Psychological Science*, 32, 217–219.
- [魏勇刚, 庞丽娟, 李琳. (2009). 数学文化与儿童数学认知. *心理科学*, 32, 217–219.]
- Xu, F., Spelke, E. S., & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, 8, 88–101.
- Zhang, H. C., & Dong, Q. (2002). Comprehensive review of cognition of mathematical cognitive ability and model of brain mechanism theory. *Journal of East China Normal University (Educational Sciences)*, 20, 12–30.
- [张红川, 董奇. (2002). 数学认知能力的认知与脑机制理论模型综述. *华东师范大学学报 (教育科学版)*, 20, 12–30.]
- Zhang, J. J., & Dong, C. F. (2006). Effects of categorical variables on false recognition. *Acta Psychologica Sinica*, 38, 324–332.
- [张积家, 董昌锋. (2006). 范畴变量对虚假记忆的影响. *心理学报*, 38, 324–332.]
- Zhang, Z., & Su, Y. J. (2007). The evolutionary foundation of human numerical competence: Implication from comparative studies. *Advances in Psychological Science*, 15, 57–63.
- [张真, 苏彦捷. (2007). 人类数能力的演化基础——数能力比较研究的启示. *心理科学进展*, 15, 57–63.]
- Zhou, X. L., & Zhang, M. L. (2003). The role of part-whole knowledge in solving addition word problems. *Acta Psychologica Sinica*, 35, 649–655.
- [周新林, 张梅玲. (2003). 部总知识在解决加法文字题中的作用. *心理学报*, 35, 649–655.]

The Integration of Arithmetic Knowledge and Semantic Knowledge in Addition Facts

CHEN Xu-Qian; HE Ben-Xuan; ZHANG Ji-Jia

(Center for Psychological Application, Department of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract

Recently, more and more researchers are interested in the relation between arithmetical cognition system and other cognitive function systems, especially the relation between arithmetical cognition system and the semantic concept system. A study done by Bassok, Pedigo, & Oskarsson (2008) showed that proper semantic context facilitated the processing of arithmetical cognition, whereas improper semantic context blocked the processing of arithmetical cognition. This result implied that people had the strong inclination to integrate the arithmetical knowledge with semantic knowledge. They believed that the integration was processed through the analogical mapping mechanism. This study aimed to further investigate the following questions based on Bassok et al. (2008): 1) mathematical cognition is affected by cultural cognitive activities (Tang, Zhang, Chen, Feng, Ji, Shen, Reiman, & Liu, 2006). However, whether the integration processing mode of arithmetical knowledge and semantic knowledge was cultural universal? 2) Whether the cognitive mechanism which integrated arithmetical knowledge and semantic knowledge was analogical mapping mechanism, or whether it was the necessary condition of analogical mapping mechanism? 3) Whether the factors which influenced semantic processing could influence the arithmetical cognition processing? Four experiments were engaged in the present study by using the revised version of semantic priming number matching task (Experiment 1 and 2) and the original semantic priming number matching task used by Bassok et al. (Experiment 3 and 4), in which the addition operation and categorical semantic relation were taken as objects, and the sum effect was taken as index.

The findings were mainly consistent with the study of Bassok et al. (2008). It suggested that the integrating process of the two kinds of knowledge is cultural universal. In addition, the categorical concept as well as the symmetry of the addition operation and categorical relation could influence the processing of addition operation. Moreover, it should be noted that Sum effect affected mainly by restraint of the neutral numbers in Experiment 1 and 2, whereas by activity of the sum numbers in Experiment 4. Therefore, the essence of Sum Effects was also discussed according to the recent results. Activity of the sum numbers can be considered as failure of restraint. Thus, the essence of Sum Effects was failure of restraint: although people tried to restrain two kinds of numbers, they can only restrain one of those (fail). These failures of restraint were mainly influenced by the pattern of the task. And the Sum effects can be represented by either of these failures. In short, results suggested a strong influence of semantic relation on arithmetical cognitive processing. The factors which could influence categorical processing could also influence addition operation processing.

Key words arithmetical cognition; addition facts; semantic integration; analogical mapping