

小学生近似数量系统敏锐度的发展趋势及其与数学能力的关系：抑制控制的中介作用*

牛玉柏¹ 张丽芬¹ 肖 帅¹ 曹贤才^{**2}

(¹浙江理工大学心理学系, 杭州, 310018) (²北京师范大学发展心理研究所, 北京, 100875)

摘 要 采用测量法和问卷法考察了 172 名小学生近似数量系统敏锐度的发展, 以及抑制控制在近似数量系统敏锐度与数学能力关系中的中介效应。结果表明: (1) 随着年龄增长, 小学生的近似数量系统敏锐度逐渐提高; (2) 近似数量系统敏锐度 (负相关序列中的韦伯系数) 和抑制控制均能显著正向预测小学生的数学能力; (3) 抑制控制在小学生近似数量系统敏锐度 (负相关序列中的韦伯系数) 与数学能力的关系中起部分中介作用。

关键词 小学生 近似数量系统 韦伯系数 抑制控制 数学能力

1 前言

物体或事件的数量除了通过言语或数字符号精确表征, 还可通过非言语的方式近似表征, 而这一表征依赖于近似数量系统 (approximate number system, ANS), 它具有近似性和不精确性, 是产生抽象数字表征的基础 (Halberda, Mazocco, & Feigenson, 2008)。ANS 对数量的表征是在“心理数字线” (mental number line) 上的一系列类似高斯曲线, 每个数量表征 (每条曲线的宽度) 的标准差反映了“噪音”的大小或者说是与那个数量不相关的错误信息 (Mazocco, Feigenson, & Halberda, 2011), 如图 1 所示。个体 ANS 噪音数量的指标通常使用韦伯系数 (w), 对数量的区分遵循韦伯定律 (Weber's law)。除了韦伯系数, 正确率也常作为 ANS 敏锐度的指标, 但韦伯系数才反映 ANS 敏锐度的本质, 韦伯系数不是依赖于数量而是数量的比率 (Halberda et al., 2008)。

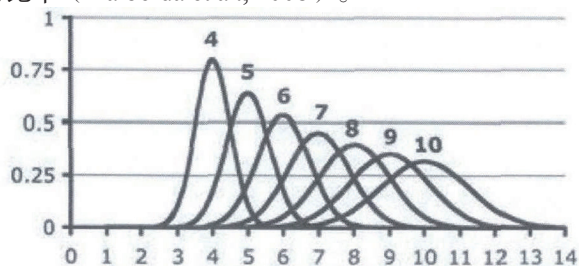


图 1 近似数量系统对数量的表征形式

不论是人类还是动物, 非言语数量表征能力都在不断发展 (Jordan, Kaplan, Ramineni, & Locuniak, 2009)。9 个月以下婴儿对于数量的区分依赖于抽象的数量表征 (Xu, Spelke, & Goddard, 2005); 3 岁到 6 岁再到成人的 ANS 敏锐度是不断提高的 (Halberda & Feigenson, 2008); 接触过正式学校教育的 11~30 岁被试的 ANS 敏锐度不断增加, 30 岁左右达到顶峰, 之后则开始缓慢下降 (Halberda, Ly, Wilmer, Naiman, & Germine, 2012)。

ANS 是更为高级的数学能力产生的基础 (Halberda et al., 2008), 很多研究均证明 ANS 敏锐度与数学能力显著正相关。横向研究表明, 在控制 3~5 岁幼儿的言语能力后, ANS 敏锐度与早期数学能力测验成绩之间显著正相关 (Libertus, Feigenson, & Halberda, 2011); 4~6 岁幼儿开始依靠 ANS 的近似表征来解决数学中的未知数问题 (Kibbe & Feigenson, 2015); 6~8 岁儿童 ANS 敏锐度与数学成绩显著相关 (Sasanguie, Göbel, Moll, Smets, & Reynvoet, 2013); 在控制了科学能力、写作能力、电脑操作的熟练程度后, 11~85 岁被试的 ANS 敏锐度与数学能力仍显著正相关 (Halberda et al., 2012)。纵向研究表明, ANS 敏锐度可以预测 4 岁幼儿 6 个月后的数学能力测验成绩 (Libertus, Feigenson, & Halberda, 2013); 学前儿童的 ANS 敏锐度能够预测其两年后的数学成绩 (Mazocco et

* 本研究得到浙江省教育厅高等学校访问学者专业发展项目 (FX2013032) 的资助。

** 通讯作者: 曹贤才。E-mail: 1005935034@qq.com

DOI: 10.16719/j.cnki.1671-6981.20180214

al., 2011), 还能预测其 14 岁时的符号数学能力 (Halberda et al., 2008)。但也存在不一致的研究结果, Holloway 和 Ansari (2009) 发现 6~8 岁儿童的非符号数任务不能预测其标准化数学成就测验分数, 这与 Kolkman 等 (2013) 针对 4~5 岁幼儿被试的研究结果相同。Inglis 等 (2011) 同时考察了 7~9 岁儿童和 18~48 岁成人 ANS 敏锐度与数学能力的关系, 结果只有儿童被试中存在显著正相关, 而成人被试则不然。因此, 儿童期 ANS 敏锐度与数学能力之间的关系还需进一步的验证。

测量 ANS 敏锐度一般采用点数比较任务, 这比用点线锚定任务 (dot-line task) 和点数估计任务 (dot-number task) 信度更高 (Chesney, Bjälkebring, & Peters, 2015)。但在点数比较任务中, 有些点的面积与数量正相关, 有些与数量负相关, 这导致前者为被试提供了非数量线索, 后者需要被试抑制这种特点而只对点的数量进行反应, 这可能反映了被试的抑制控制能力, 而不仅是非符号表征的精确度 (Gilmore et al., 2013), 此时抑制控制能力可能是 ANS 敏锐度与数学能力关系间的关键中介因素 (Clayton & Gilmore, 2014)。抑制控制与数学能力相关 (Bull, Phillips, & Conway, 2008; Nayfeld, Fuccillo, & Greenfield, 2013; Visu-Petra, Cheie, Benga, & Miclea, 2011), 被鉴定为数学学习困难的儿童比有平均水平的儿童在抑制任务上表现更差 (Winegar, 2013)。采用 Stroop 范式测量的抑制控制与数学成就无关, 使用停止信号任务测得的抑制控制却与数学成就相关, 而停止信号任务更适合小学生 (St Clair-Thompson & Gathercole, 2006)。

ANS 敏锐度和抑制控制能力在儿童期 (22~83 months) 均不断发展, 发展轨迹也非常相似 (Carlson, 2005), 二者间可能存在相互作用。用点数比较任务测得的 18~25 岁青年的 ANS 敏锐度与用 Stroop 任务测得的抑制控制能力显著相关 (Norris & Castronovo, 2016), 与 Fuhs 和 McNeil (2013) 用三种不同的 Stroop 任务测量的结果一致。Gilmore 等 (2013) 也发现, 当控制了抑制控制后, ANS 敏锐度不能显著预测 7~10 岁儿童的数学成绩。但是 Dewind 等 (2015) 表明, 点数比较任务中抑制控制等因素对 ANS 敏锐度的影响相对数量特征较小, 因此点数比较任务成绩主要体现的还是 ANS 敏锐度而非抑制控制能力。Halberda 等 (2008) 发现抑制控制并不影响 ANS 敏锐度与数学能力间的关系。因此

要明确三者之间的具体关系, 还需进一步的验证。

目前关于 ANS 敏锐度的相关研究主要集中在幼儿和成人, 但是有关小学生 ANS 敏锐度的发展研究相对较少, 国内更甚 (李红霞, 司继伟, 陈泽建, 张堂正, 2015), 马俊巍 (2012) 发现小学生 ANS 敏锐度会随着年龄增长而缓慢增强, 但其没有采用韦伯系数来反映小学生 ANS 敏锐度的发展。通过 ANS 敏锐度的训练可以提高儿童的数学能力 (Dewind & Brannon, 2012; Hyde, Khanum, & Spelke, 2014; Park & Brannon, 2013), 小学生 ANS 敏锐度与数学能力的关系值得进一步探讨, 并且是否存在第三变量——抑制控制的影响也尚不明确, 仍需新的实证研究验证 (Gilmore et al., 2013)。

2 研究方法

2.1 被试

方便选取慈溪市某所农村小学学生共 201 人。剔除极端数据和未完成测验的数据, 有效被试 172 人, 其中一年级 50 人 ($7.11 \pm .73$ 岁), 三年级 55 人 ($9.00 \pm .50$ 岁), 五年级 67 人 ($11.29 \pm .61$ 岁)。

2.2 实验材料和工具

2.2.1 中国小学生数学基本能力测试量表

采用吴汉荣和李丽 (2005) 修订的量表, 包括量表包括数学运算、逻辑思维与空间视觉功能 2 个分量表。量表的 Chronbach's $\alpha > .7$, 分半信度 r 为 .83, 结构效度因子载荷 .7 以上, 分量表与总量表相关系数 .5 以上, 区分效度 $p < .01$, 各项指标均符合测量学标准。

2.2.2 点数比较任务 (non-symbolic magnitude comparison task)

参考 Halberda 和 Feigenson (2008) 测量 ANS 敏锐度的方法, 要求儿童判断电脑屏幕上相互分离的蓝色和黄色的点阵列哪个数量更多。测试包含 6 个练习试次和 80 个实验试次, 每个试次呈现 1200ms。每种颜色点数量范围为 5~21, 两种颜色点的数量比率为 1:2, 3:4, 5:6, 7:8。为了平衡其他无关因素, 一半试次黄色点更多, 一半蓝色点更多; 一半试次两阵列点的平均面积相等, 即数量和面积成正比 (正相关序列), 结果记为“序列 1 正确率”和“序列 1w”, 一半点的总面积相等, 即数量和点的面积成反比 (负相关序列), 结果记为“序列 2 正确率”和“序列 2w”。儿童口头回答后由主试按键, 记录判断的正确率。

2.2.3 停止信号任务 (stop-signal task)

Logan (1994) 采用该任务测量与执行功能密切相关的抑制控制。停止信号任务最大的优点是停止反应时 (SSRT) 可以将被试的抑制能力进行量化, 该任务是一个对 6~12 岁儿童期发展敏感的抑制任务 (朱湘茹, 李永鑫, 李莉, 2012)。实验分为 16 个练习试次, 两组正式实验各 64 个试次, 三部分间均休息 10 秒。根据 Logan (1994) 的数学模型计算出的停止信号反应时 (SSRT) 作为停止信号任务的成绩, $SSRT = go\ RT - SSD$, 其中 go RT 表示对图片刺激作出反应的时间, SSD 表示声音信号刺激与图片刺激出现的时间间隔。SSRT 值越小, 表明付出的抑制努力越大, 所需要的抑制控制能力越好。

2.3 实验程序

数学能力测验在班级教室集体施测, 时间严格控制, 其中数学运算分量表 7 分钟; 逻辑推理与空间-视觉功能分量表 11 分钟。三、五年级学生的点数比较任务和停止信号任务在计算机教室集体施测, 一年级学生进行个别施测。

3 结果分析

3.1 各变量的描述性统计

完成测验的人数及描述性统计结果见表 1。

3.2 小学生 ANS 敏锐度的发展

3.2.1 以正确率为指标

描述性统计结果如表 2, 被试判断的正确率均大于随机水平 ($p < .01$)。

进行 3 (年级) \times 4 (比率) 方差分析: 以总

表 1 各变量的描述性统计结果 ($n=172$)

变量	极小值	极大值	<i>M</i>	<i>SD</i>
数学运算	12.00	238.00	139.09	67.22
逻辑空间	41.00	297.00	162.19	55.26
数学能力总分	78.00	524.00	301.28	115.28
点数比较任务正确率	45.00%	88.75%	73.63%	9.94%
抑制正确率	33.30%	100.00%	84.04%	14.24%
SSRT (ms)	207.80	774.80	391.74	109.53

表 2 小学生在不同比率下点数比较任务的正确率 (%) ($M \pm SD$)

	年级 (<i>n</i>)	比率 (1:2)	比率 (3:4)	比率 (5:6)	比率 (7:8)
总正确率	一 (50)	81.90 \pm 9.84	71.40 \pm 10.20	63.00 \pm 10.79	63.30 \pm 13.04
	三 (55)	85.46 \pm 16.25	75.00 \pm 11.63	63.73 \pm 12.48	66.55 \pm 12.24
	五 (67)	91.27 \pm 12.98	80.30 \pm 10.97	69.40 \pm 12.20	67.76 \pm 13.46
序列 1 正确率	一 (50)	87.80 \pm 9.75	74.00 \pm 15.91	68.60 \pm 14.57	67.80 \pm 14.75
	三 (55)	89.64 \pm 15.51	79.27 \pm 14.76	73.09 \pm 15.97	71.46 \pm 15.57
	五 (67)	92.24 \pm 14.23	82.99 \pm 13.82	74.93 \pm 17.53	71.34 \pm 16.50
序列 2 正确率	一 (50)	75.60 \pm 14.31	69.00 \pm 12.33	57.20 \pm 16.54	58.80 \pm 17.34
	三 (55)	81.27 \pm 19.25	70.73 \pm 15.38	54.36 \pm 14.63	61.64 \pm 15.00
	五 (67)	90.30 \pm 14.46	77.61 \pm 14.04	63.88 \pm 15.27	64.18 \pm 17.85

注: 总正确率: 所有序列的正确率; 序列 1 正确率: 面积与数量正相关序列的正确率; 序列 2 正确率: 面积与数量负相关序列的正确率。

正确率为因变量时, 年级主效应显著, $F(2, 169) = 8.78, p < .001, \eta^2 = .09$, 一、三年级均与五年级被试的成绩差异显著 ($p < .05$); 比率主效应显著, $F(3, 507) = 199.71, p < .001, \eta^2 = .54$, 除比率 5:6 与 7:8 时被试成绩差异不显著, 其他比率间成绩差异均显著 ($ps < .001$); 比率与年级的交互作用不显著。以序列 1 正确率为因变量时, 年级主效应显著, $F(2, 169) = 4.28, p < .05, \eta^2 = .05$, 一、五年级被试的成绩差异显著 ($p < .01$); 比率主效应显著, $F(3, 507) = 88.36, p < .001, \eta^2 = .34$, 除比率 5:6 与 7:8 时被试的成绩差异不显著, 其他比率间成绩差异均显著 ($p < .001$); 比率与年级的交互作用不显著。以

序列 2 正确率为因变量时, 年级主效应显著, $F(2, 169) = 11.98, p < .001, \eta^2 = .12$, 一、三年级均与五年级被试的成绩差异显著 ($ps < .001$); 比率的主效应显著, $F(3, 507) = 112.05, p < .001, \eta^2 = .40$, 所有比率间成绩差异均显著 ($p < .001$); 比率与年级的交互作用不显著。

3.2.2 以韦伯系数 (*w*) 为指标

采用心理物理学模型对被试的韦伯系数进行估计 (Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004)。在该任务中, 每个被试在各比率下均存在一个正确率, 通过 L-M 算法可以获得自由参数 *w*, *w* 越小表明 ANS 敏锐度越高。描述性统计结果如表 3 所示, 进行单因素方

表3 小学生点数比较任务下的韦伯系数值 ($M \pm SD$)

年级 (n)	w 总	序列 1w	序列 2w
一 (50 人)	.45±.20	.35±.20	.54±.22
三 (55 人)	.32±.13	.24±.14	.45±.19
五 (67 人)	.25±.10	.21±.10	.32±.19

注：w 总：所有序列的韦伯系数值；序列 1w：面积与数量正相关序列的韦伯系数值；序列 2w：面积与数量负相关序列的韦伯系数值。

差分析,以 w 总分为因变量时,年级主效应显著, $F(2, 169) = 27.81, p < .001, \eta^2 = .25$, 三个年级被试的韦伯系数值差异均显著 ($p < .001$), 即一年级 w 总分显著大于三年级, 三年级 w 总分显著大于五年级。

以序列 1w 分数为因变量时, 年级主效应显著, $F(2, 169) = 13.93, p < .001, \eta^2 = .14$, 一年级被试均高于三、五年级被试成绩 ($ps < .001$); 以序列 2w 分数为因变量时, 年级主效应显著, $F(2, 169) = 18.90, p < .001, \eta^2 = .18$, 三个年级被试的韦伯系数

值差异均显著 ($ps < .05$)。同时还发现, 以序列 1w 为指标时, 被试的 ANS 敏锐度虽然随着年龄增长而不断提高, 但速率逐渐趋于平缓, 这与韦伯定律的变化趋势相符合。

3.3 各变量间的相关分析

控制被试年龄后对各变量进行偏相关分析, 结果见表 4 所示。

ANS 敏锐度的各项指标得分相关均显著 ($ps < .01$); w 总与数学运算、数学能力, 序列 1w

表4 各变量间的偏相关分析

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 w 总	1								
2 序列 1w	.76**	1							
3 序列 2w	.68**	.36**	1						
4 总正确率	-.70**	-.68**	-.63**	1					
5 序列 1 正确率	-.78**	-.80**	-.40**	.84**	1				
6 序列 2 正确率	-.60**	-.33**	-.66**	.83**	-.60**	1			
7 数学运算	-.18*	-.18*	-.07	.13	.19*	.04	1		
8 逻辑空间	-.11	-.07	-.18*	.06	.07	.02	.53**	1	
9 数学能力	-.16*	-.14	-.21**	.11	.14	.04	.87**	.88**	1
10 SSRT	.12	.05	.24**	-.09	-.10	-.05	-.15*	-.19*	-.19*

注：* 表示 $p < .05$, ** 表示 $p < .01$, * 表示边缘显著, 下同。

与数学运算, 序列 2w 与逻辑空间、数学能力相关均显著 ($ps < .01$); 序列 1 正确率与数学运算相关显著 ($p < .05$), 其余各项间的相关均不显著。这表明以 w 为指标时, ANS 敏锐度与小学生数学能力的关联性更强。SSRT 与数学能力 ($p < .05$)、逻辑空间 ($p < .05$), 和序列 2w ($p < .01$) 的相关显著, 可见抑制控制与数学能力、ANS 敏锐度 (序列 2w) 显著相关。

3.4 抑制控制的中介效应分析

被试的序列 2w、SSRT 与数学能力偏相关均显著 ($p < .05$), 满足进行中介检验的前提条件 (温忠麟, 叶宝娟, 2014)。各变量数据经中心化处理, 按步骤进行回归分析。第一步, 以序列 2w 为自变量, 数学能力为因变量建立回归方程 $Y = cX + e$; 第二步, 以序列 2w 为自变量, SSRT 为因变量建立回归方程 $M = aX + e_1$; 第三步, 以序列 2w 和 SSRT 为自变量, 数学能力为因变量建立回归方程 $Y = c'X + bM + e'$ 。

其中 c 是 X 对 Y 的总效应, c' 是 X 对 Y 的间接效应, 并且 $c = c' + ab$ 。路径分析见图 2。ANS 敏锐度 (序列 2w) 对数学能力的路径及效应分解见表 5 所示。

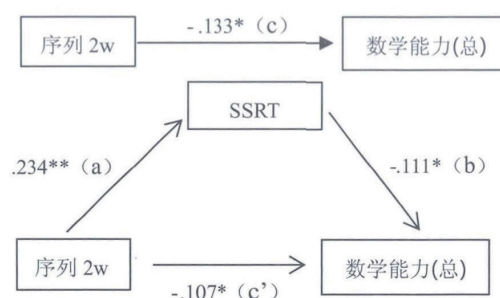


图2 模拟路径系数图

由此可知, 小学生的序列 2w 和 SSRT 得分均能显著负向预测数学能力, 即小学生 ANS 敏锐度 (序列 2w) 和抑制控制均能够显著正向预测数学能力。并且小学生的抑制控制在 ANS 敏锐度 (序列 2w) 与数学能力之间起部分中介作用, 即 ANS 敏锐度 (序

列 2w) 可以通过抑制控制能力的部分中介作用影响数学能力的发展, 中介效应占总效应的 19.53%。

4 讨论

本研究旨在探讨小学生近似数量系统敏锐度的发展, 以及小学生近似数量系统敏锐度与数学能力、抑制控制能力之间的关系。结果表明, 随着年龄增长, 小学生的近似数量系统敏锐度逐渐提高, 近似数量系统敏锐度 (负相关序列中的韦伯系数) 和抑制控制均能显著正向预测小学生的数学能力, 抑制控制

在小学生近似数量系统敏锐度 (负相关序列中的韦伯系数) 与数学能力的关系中起部分中介作用。

4.1 小学生 ANS 敏锐度的发展

小学生 ANS 敏锐度 (w 值和正确率) 随着年龄增长变得更加精确, 这与马俊巍 (2012) 的结果相似。其原因: 一方面, 随着小学生年龄的增长, ANS 逐渐成熟, 敏锐度会越来越好; 另一方面, 学校教育对 ANS 敏锐度的影响。Pica 等 (2004) 发现接触过数学教育的法国成人的数量区分能力显著优于缺少数学经验的亚马逊原著居民, 可见数学经验对 ANS

表 5 ANS 敏锐度 (序列 2w) 对数学能力的路径及效应分解

路径关系	效应值	效应所占比例
ANS 敏锐度 (序列 2w) → 数学能力	.107	80.47%
ANS 敏锐度 (序列 2w) → 抑制控制 → 数学能力	.234×.111	19.53%
总计	.133	100%

敏锐度也有重要影响。随着点数比率越来越接近 1, 儿童判断的正确率也随之降低, 表明小学生对数量的区分能力依赖于数量间的比率, 支持了韦伯定律适用于描述儿童的假定。

4.2 小学生 ANS 敏锐度与数学能力的关系

在控制年龄变量后, 小学生 ANS 敏锐度 (序列 2w) 与数学能力正相关显著, 且回归分析结果表明, 小学生 ANS 敏锐度 (序列 2w) 能够显著正向预测数学能力, 支持了前人关于 ANS 敏锐度可以预测数学能力的研究结果 (Halberda et al., 2008; Halberda et al., 2012; Inglis et al., 2011; Sasanguie et al., 2013)。ANS 敏锐度低导致对于数学相关活动的卷入减少, 进而导致了数学能力的降低 (Libertus, Odic, & Halberda, 2012)。本研究发现只有以韦伯系数 (序列 2w) 为指标的 ANS 敏锐度能够显著预测数学能力, 以往研究也表明, 点数比较任务中的负相关序列需要抑制控制参与 (Clayton & Gilmore, 2014), 测得的 ANS 敏锐度与数学能力相关更大 (Norris & Castronovo, 2016); 但也有研究发现控制抑制控制能力后, ANS 敏锐度与数学能力相关依然显著 (Gilmore, Keeble, Richardson, & Cragg, 2015)。

4.3 抑制控制的中介效应

测量 ANS 敏锐度的点数比较任务存在两种形式: 点数与面积正相关和点数与面积负相关, 本研究发现, 负相关序列的点的面积对被试的数量判断产生了负面影响, 被试先要抑制点面积的非数量刺激, 进而近似数量表征系统才对数量进行

感知与比较 (Gilmore et al., 2013), 本研究结果表明抑制控制在 ANS 敏锐度 (序列 2w) 与数学能力间起部分中介作用。大脑成像研究发现, 抑制控制激活了前额叶和顶叶等脑区 (王君, 陈天勇, 2012), 而成人在进行算数计算时激活的脑区和点数比较任务激活的区域也是顶叶皮层 (Miyake et al., 2000), 可见 ANS、抑制控制与数学能力激活的脑区有重叠的部分, ANS 敏锐度与抑制控制可能具有共同的认知成分, 这些研究均为三者的关系提供了更深层的解释。

本研究结果显示中介作用整体上占总效应很小的一部分, 可能是在测量任务选取和控制变量上有一定的局限性。未来的研究中, 可以使用效度其它 ANS 测量方法, 如用跨通道数量比较任务, 以降低对抑制控制的需求 (Barth, La, Lipton, & Spelke, 2005)。再者, 测量抑制控制的任务也可能要改进, 对特定任务的抑制能力要选用特定的刺激 (Gilmore et al., 2015), 也就是由一种任务测量出来的抑制控制能力不具有领域普遍性, 应该采用多种方法来测量抑制控制能力。也有研究指出, ANS 敏锐度与数学能力的关系可能是双向的 (Mussolin, Nys, Content, & Leybaert, 2014), ANS 敏锐度在抑制控制与数学能力间可能起中介作用 (曹贤才, 时冉冉, 牛玉柏, 2016), 未来仍需进一步通过建模来验证这些设想。最后, 由于客观条件的限制, 被试只选取农村小学的学生, 虽然弥补了当前相关研究主要集中于中高收入家庭孩子的不足 (Fuhs & Mcneil, 2013), 但未来研究仍需扩大被试的范围。

参考文献

- 曹贤才, 时冉冉, 牛玉柏. (2016). 近似数量系统敏锐度与数学能力的关系. *心理科学*, 3, 580–586.
- 李红霞, 司继伟, 陈泽建, 张堂正. (2015). 人类的近似数量系统. *心理科学进展*, 23(4), 562–570.
- 王君, 陈天勇. (2012). 抑制控制与高级认知功能的关系. *心理科学进展*, 20(11), 1768–1778.
- 温忠麟, 叶宝娟. (2014). 中介效应分析: 方法和模型发展. *心理科学进展*, 5, 731–745.
- 吴汉荣, 李丽. (2005). 小学生数学能力测试量表的编制及信效度检验. *中国公共卫生*, 21(4), 473–475.
- 朱湘茹, 李永鑫, 李莉. (2012). 6–12 岁儿童抑制能力的发展: 来自停止信号任务的证据. *心理与行为研究*, 10(6), 438–442.
- Barth, H., La, M. K., Lipton, J., & Spelke, E. S. (2005). Abstract number and arithmetic in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(39), 14116–14121.
- Bull, R., Phillips, L. H., & Conway, C. A. (2008). The role of control functions in mentalizing: Dual-task studies of theory of mind and executive function. *Cognition*, 107(2), 663–672.
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595.
- Chesney, D., Bjalkhebring, P., & Peters, E. (2015). How to estimate how well people estimate: Evaluating measures of individual differences in the approximate number system. *Attention Perception and Psychophysics*, 77(8), 2781–2802.
- Clayton, S., & Gilmore, C. (2014). Inhibition in dot comparison tasks. *ZDM*, 47(5), 1–12.
- Dewind, N. K., Adams, G. K., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2015). Modeling the approximate number system to quantify the contribution of visual stimulus features. *Cognition*, 142, 247–265.
- Dewind, N. K., & Brannon, E. M. (2012). Malleability of the approximate number system: Effects of feedback and training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(1), 68.
- Fuhs, M. W., & McNeil, N. M. (2013). ANS acuity and mathematics ability in preschoolers from low-income homes: Contributions of inhibitory control. *Developmental Science*, 16(1), 136.
- Gilmore, C., Attridge, N., Clayton, S., Cragg, L., Johnson, S., Marlow, N., et al. (2013). Individual differences in inhibitory control, not non-verbal number acuity, correlate with mathematics achievement. *PLoS ONE*, 8(6), e67374.
- Gilmore, C., Keeble, S., Richardson, S., & Cragg, L. (2015). The role of cognitive inhibition in different components of arithmetic. *ZDM*, 47(5), 771–782.
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the "number sense": The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457–1465.
- Halberda, J., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q., & Germine, L. (2012). Number sense across the lifespan as revealed by a massive Internet-based sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(28), 11116–11120.
- Halberda, J., Mazocco, M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668.
- Holloway, I. D., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(1), 17–29.
- Hyde, D. C., Khanum, S., & Spelke, E. S. (2014). Brief non-symbolic, approximate number practice enhances subsequent exact symbolic arithmetic in children. *Cognition*, 131(1), 92–107.
- Inglis, M., Attridge, N., Batchelor, S., & Gilmore, C. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement: But only in children. *Psychonomic Bulletin and Review*, 18(6), 1222.
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2009). Early math matters: Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 850.
- Kibbe, M. M., & Feigenson, L. (2015). Young children "solve for X" using the approximate number system. *Developmental Science*, 18(1), 38.
- Kolkman, M. E., Kroesbergen, E. H., & Leseman, P. P. M. (2013). Early numerical development and the role of non-symbolic and symbolic skills. *Learning and Instruction*, 25(2), 95–103.
- Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental Science*, 14(6), 1292.
- Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2013). Is approximate number precision a stable predictor of math ability. *Learning and Individual Differences*, 25(25), 126.
- Libertus, M. E., Odic, D., & Halberda, J. (2012). Intuitive sense of number correlates with math scores on college-entrance examination. *Acta Psychologica*, 141(3), 373–379.
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A users' guide to the stop signal paradigm. *Inhibitory Processes in Attention Memory and Language*, 189–239.
- Mazzocco, M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (dyscalculia). *Child Development*, 82(4), 1224–1237.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100.
- Mussolin, C., Nys, J., Content, A., & Leybaert, J. (2014). Symbolic number abilities predict later approximate number system acuity in preschool children. *PLoS ONE*, 9(3), e91839.
- Nayfeld, I., Fuccillo, J., & Greenfield, D. B. (2013). Executive functions in early learning: Extending the relationship between executive functions and school readiness to science. *Learning and Individual Differences*, 26(26), 81–88.
- Norris, J. E., & Castronovo, J. (2016). Dot display affects approximate number system acuity and relationships with mathematical achievement and inhibitory control. *PLoS ONE*, 11(5), e0155543.
- Park, J., & Brannon, E. M. (2013). Training the approximate number system improves math proficiency. *Psychological Science*, 24(10), 2013–2019.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, 306(5695), 499–503.
- Sasanguie, D., Göbel, S. M., Moll, K., Smets, K., & Reynvoet, B. (2013). Approximate number sense, symbolic number processing, or number-space mappings: what underlies mathematics achievement? *Journal of Experimental*

- Child Psychology*, 114(3), 418.
- St ClairThompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745–759.
- Visu-Petra, L., Cheie, L., Benga, O., & Miclea, M. (2011). Cognitive control goes to school: The impact of executive functions on academic performance. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 11(6), 240–244.
- Winegar, K. L. (2013). *Inhibition performance in children with math disabilities*. Dissertations & Theses – Gradworks.
- Xu, F., Spelke, E. S., & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, 8(1), 88.

Approximate Number System Acuity of Primary School Students: Developmental Tendency and Its Relationship with Inhibitory Control and Mathematical Ability

Niu Yubai¹, Zhang Lifan¹, Xiao Shuai¹, Cao Xianca²

(¹Department of Psychology, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou, 310018)

(²Institute of Developmental Psychology, Beijing Normal University, Beijing, 100875)

Abstract Humans and animals have a system which approximately represents the number of objects or events in a nonverbal way. This system is called the Approximate Number System (ANS), and was found to improve with age. A number of studies have shown a positive correlation between ANS acuity and mathematical ability. Recent research suggests ANS acuity's contribution to mathematics ability might be affected by individuals' ability of inhibitory control. However, it is still unclear what role the inhibitory control plays in this relationship. With regard to this issue, there were three main purposes in this study. (1) To explore how ANS acuity develops among primary students; (2) To examine whether ANS acuity correlates with the mathematical ability in the primary school stage; (3) To examine whether inhibitory control is a mediating factor between ANS acuity and mathematical ability.

A hundred and seventy-two rural pupils who were in grade 1 (50 students, age 7.11 ± 0.73 years), grade 3 (55 students, age 9.00 ± 0.50 years), and grade 5 (67 students, age 11.29 ± 0.61 years) participated in this study. They were arranged to complete the Chinese Students Basic Math Ability Test Scale, Stop-signal task, and non-symbolic magnitude comparison task to measure their mathematical ability, inhibitory control ability, and ANS acuity respectively. Specifically, the mathematical ability test was a class centralized testing, and the test time was strictly controlled. Besides, the stop-signal task and non-symbolic magnitude comparison task were intensively measured in a computer class for the grade 3 and grade 5 students, while the grade 1 students were measured individually.

Results revealed that (1) With age, pupils' ANS acuity generally improved, but from grade 1 to grade 3 the improvement was relatively slower than other grades, while from grade 3 to grade 5 pupils' ANS acuity improved rapidly, $p < .01$; (2) ANS acuity (w of negative sequence), inhibition control (SSRT) and mathematical abilities were significantly correlated with each other, $p < .05$; (3) After controlling age, pupils' mathematical ability was positively predicted by ANS acuity (w of negative sequence) as well as the ability of inhibitory control (SSRT) ($ps < .05$); (4) The relationship between mathematical ability and the ANS acuity (w of negative sequence) was partially mediated by the ability of inhibitory control, and the mediation effect accounted for 19.53% of the total effect.

The findings of the present study were consistent with previous research, which were mainly conducted among preschoolers or adults. Although some researchers claimed that the influence of ANS acuity on mathematics ability might be affected by the inhibitory control, rare empirical study testified this hypothesis. This study adopted primary school children as participants and was an extension to previous study. We investigated the development of ANS acuity and its relationship with mathematical ability, as well as the role of inhibitory control in this relationship. As the conclusion, (1) In primary school, students' ANS acuity continues to improve with age; (2) Both ANS acuity and inhibitory control ability can positively predict the mathematical ability among primary school students; (3) Inhibitory control ability can partially mediate the relationship between mathematical ability and ANS acuity. These findings may be helpful to improve mathematics teaching and learning in primary schools.

Key words primary school students, approximate number system, inhibitory control, weber fraction, mathematical ability