

6-9岁儿童工作记忆的发展研究*

王晓丽**¹ 陈国鹏² 马娟子² 孙秀庆³ 孙志凤⁴

(¹西北师范大学心理学院, 兰州, 730070)(²华东师范大学心理与认知科学学院, 上海, 200062)

(³康城实验学校, 上海, 201100)(⁴南京大学教育研究院, 南京, 210093)

摘要 以 Baddeley 工作记忆模型为基础考察儿童语音环路、视觉空间模板、中央执行的发展及其与复杂广度的关系。225 名 6-9 岁儿童完成 9 个任务, 分别测量听力广度及工作记忆三个子系统功能。发现工作记忆各子成分在 6-9 岁期间发展速度不同; 中央执行与语音环路和视觉空间模板的联系随年龄增长加强; 结构方程模型分析发现中央执行和语音环路对儿童听力广度都有显著影响, 表明言语复杂广度任务既涉及中央执行功能也涉及语音环路的存贮功能。

关键词 工作记忆 语音环路 视觉空间模板 中央执行 发展

1 引言

工作记忆在人类认知过程中的作用至关重要, 新皮亚杰主义者甚至认为工作记忆是思维发展的核心机制。很多证据表明工作记忆的能力与学业成就密切相关。Alloway 和 Alloway (2010) 发现工作记忆比智商更好地预测儿童六年以后的阅读、拼写和数学成绩。然而在学校情境中, 人们却很少意识到工作记忆对学习的影响, 一个重要原因在于教育情境中很难对工作记忆进行测量。Baddeley (2007) 的工作记忆模型为理解工作记忆的发展提供了理论框架, 他提出工作记忆由中央执行和两个存贮子系统构成, 中央执行有四种功能: 注意聚焦、注意分配、注意转换及与长时记忆建立联结, 语音环路负责语音信息的存储和复述, 视觉空间模板保持视觉和空间信息。

很多研究者采用数字广度或词语广度测量语音环路的存贮能力, 用视觉模式广度、柯西块测验等任务测量视觉空间模板的存贮能力 (Gathercole, Pickering, Ambridge & Wearing, 2004); 计数广度、阅读广度等复杂广度 (也称工作记忆广度) 任务常被用来测量中央执行。发展研究者采用这些任务对工作记忆各个子系统的发展进行探索。Hulme 和 Mackenzie (1992) 发现 4 岁儿童可回忆 3 个数字, 12 岁时回忆 6 个, 16 岁时增至 7-8 个。吴卫国和苏彦捷 (2008) 用顺背数字和倒背数字测量 6-12 岁儿童工作记忆, 发现顺背数字能力在 9 岁时基本达到成人水平, 而倒背数字能力还在继续发展, 他们认为顺背数字代表短时存贮能力, 倒背数字代表工作记忆能

力。段小菊, 施建农, 冉瑜英 (2009) 发现从 8 岁到成人期间数字复杂广度持续增长, 词语复杂广度在 18 岁达到高峰, 视觉空间复杂广度在 14-16 岁达到高峰。这些证据表明工作记忆各子系统有不同的发展轨迹。但有关儿童期工作记忆发展的研究很少有同时考虑三个子系统的。本研究希望通过测量三个子系统来了解其发展的全貌。

测量儿童工作记忆的最大困难是中央执行。很多研究采用复杂广度测量中央执行, 但实验心理学家对这一任务究竟测量了什么一直存在争议。争论的核心是它反映了单一的中央执行限制, 还是会受到视觉或听觉存贮子系统的影响。近年来有研究表明复杂广度任务不仅受到中央执行的限制, 也受存贮子系统的影响 (Fougnie & Marois, 2011), 但这些证据来自于成人被试。如果儿童的复杂广度也受中央执行与存贮子系统影响的话, 那么用它来评估中央执行能力则有失偏颇。因此需要了解儿童期复杂广度与工作记忆各个子系统之间的关系。工作记忆模型的发展, 特别是对中央执行的认知逐渐清晰, 使我们可以采用对存贮功能需求较少的任务来测量中央执行。本研究根据 Baddeley 模型采用 8 个任务测量工作记忆, 2 个语音环路任务 (数字广度和非词广度)、2 个视觉空间模板任务 (空间广度和视觉模式广度)、4 个中央执行任务 (注意转换、注意焦点、注意分配及长时记忆提取)。

2 方法

2.1 被试

上海市某小学 225 个儿童参与本研究, 有效数

* 本研究得到全国教育科学“十一五”规划教育部青年专项 (EBA100363) 的资助。

** 通讯作者: 王晓丽。E-mail: wangxiaoli.sh@gmail.com

据为214人。6岁组39人(23男,16女),7岁组71人(41男,30女),8岁组60人,(36男,24女);9岁组44人(21男,23女)。所有被试视力正常。

2.2 测量工具

数字广度任务以每秒1个的速度呈现一系列数字,要求被试按顺序回忆。从2个数字的系列开始,每个长度有3次尝试,如果正确回忆2次以上,则长度加1后继续进行,否则测试停止。能够正确回忆3次的最大长度为记忆广度,如果下一个长度中又有1次成功尝试,则广度加1/3。非词广度任务以非词作为记忆项目,程序与数字广度相同。数字和非词均以声音形式呈现。

空间广度任务由主试在25个积木构成的5×5矩阵上以1秒1次的速度点击积木,形成一定长度的随机路径(图1),要求被试重复点击。视觉模式广度任务给被试呈现格子矩阵(图2),3秒后被试在空白矩阵中标出黑格位置,黑格数目为视觉模式的大小。这两个任务程序均与数字广度任务相同。

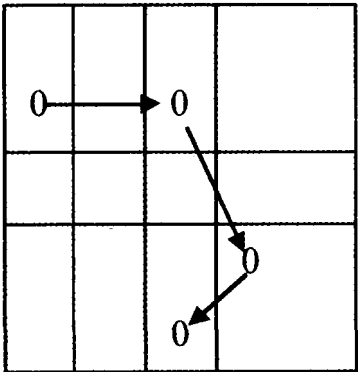


图1 空间广度任务的刺激材料图示

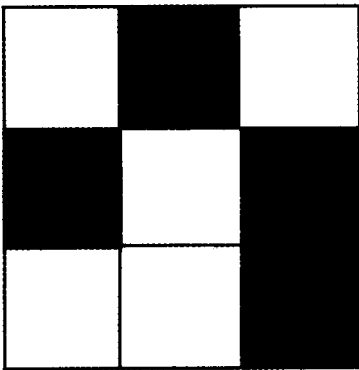


图2 视觉模式广度任务的刺激材料图示

注意焦点任务根据彭华茂、张凌、申继亮(2009)的程序改编,要求被试判断同时呈现的一系列数字是否有尾数相同的情况,数字数目逐渐增加。每个长

度有4次尝试,3次失败时任务中止,正确反应的次数记为焦点分数。

注意转换任务给被试呈现一个两位数,当数字为红色时判断是单数或双数,绿色时判断是否大于50。练习20次,正式测验40次。一般成人被试注意转换能力是通过两任务之间转换与不转换的反应时差来表明,本研究发现儿童正确率-反应时权衡策略不同于成人,他们更多关注正确率,而任务转换与未转换的反应时差没有显著差异,因此采用正确反应次数作为转换分数。

用对记忆要求较低的计数任务(Chan, Wang, Ye, Leung, & Mok, 2008)测量注意分配能力。该任务需要被试听录音时一边计数不定期的“砰”声,一边记住录音中的动物名称。播放完后被试报告该动物名及“砰”的数目,共10次尝试,答对一项记1分,总分20。

用类别联结任务测量长时记忆信息的提取。类别联结任务要求被试根据给定的类别,快速提取信息,其加工过程与中央执行“与长时记忆建立联结”功能在概念上具有一定重合性,且与工作记忆的子功能有密切相关(陆爱桃,张积家,莫雷,2008;杨雅颀,张富昌,高晓彩,王剑,孟祥辉,2012)。为减少知识经验影响,用儿童熟悉的食物和动物类别,要求说出尽可能多的食物和动物词汇,每类限时1分钟,两个类别产词量之和为长时记忆提取分数。

听力广度任务以声音形式呈现一系列句子,要求被试听到句子后立即判断正误,并记住最后一词,所有句子呈现完后,将这些词回忆出来。句子数目逐渐增加。每个长度系列有3次尝试,全部失败时结束任务。正确尝试数目记为听力广度分数。

2.3 程序

在学校安静的房间里进行。被试以相同顺序完成9个任务。测试分2次进行,每次约40分钟。两次测试之间相隔2-3天。注意焦点和注意转换任务通过E-prime1.0完成,其他任务由经过训练的主试进行单独测试。

3 结果

3.1 工作记忆各项测量任务的得分情况

6-9岁儿童各项测量任务上的成绩如表1所示。

ANOVA分析表明所有任务成绩随年龄显著提高。Tukey HSD事后检验表明8岁儿童听力广度显著高于7岁($p < .01$),9岁儿童听力广度显著高于

表 1 6-9 岁儿童工作记忆任务的得分情况

测量任务		6 岁		7 岁		8 岁		9 岁		F(3,210)	η^2
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD		
	听力广度	5.31	1.21	5.96	1.33	6.87	1.75	7.73	1.66	21.88**	.23
语音	数字广度	5.91	.13	6.30	.11	6.68	.12	7.18	.11	18.07**	.21
环路	非词广度	2.65	.08	2.83	.07	2.87	.07	3.19	.06	8.23**	.11
视觉空间	视觉模式	4.62	.19	5.18	.11	5.88	.13	6.23	.16	21.51**	.24
模板	空间广度	3.76	.08	4.15	.09	4.62	.10	4.60	.13	14.29**	.17
中央	长时提取	12.39	.64	14.96	.56	14.64	.49	16.97	.64	8.51**	.10
执行	注意转换	19.92	.70	23.72	.62	25.65	.69	26.55	.80	13.86**	.17
	注意分配	8.79	.55	10.49	.36	11.73	.38	14.11	.38	24.50**	.26
	注意焦点	4.74	.64	7.24	.50	7.11	.47	9.16	.67	8.12**	.10

注: ** $p < .01$.

8 岁 ($p = .05$); 数字广度和非词广度在 6-7 和 7-8 岁增长不显著, 在 8-9 岁增长显著 ($p < .01$); 视觉模式和空间广度 6-7 和 7-8 岁显著提高 ($p < .01$), 8-9 岁增长不显著。中央执行功能存在显著年龄效应。长时记忆提取、注意分配和注意焦点在

6-7 岁、8-9 岁增长显著 ($p < .01$), 7-8 岁差异不显著, 注意转换任务成绩在 6-7 岁之间呈现显著增长 ($p < .01$)。为比较各任务成绩在 6-9 岁之间随着年龄变化的速度, 进行回归分析, 标准化回归系数如表 2。

表 2 测量分数随年龄变化的标准化回归系数

测量	数字广度	非词广度	视觉模式	空间广度	长时提取	注意转换	注意分配	注意焦点
β	.45**	.30**	.48**	.38**	.28**	.39**	.50**	.29**

注: ** $p < .01$

3.2 语音环路、视觉空间模板、中央执行的关系

各测量原始分数转换为标准分后, 将与各子系统相关的几项测量分数标准分的平均值作为该子系统的得分, 再进行相关分析(表 3), 发现在不同年龄三个子系统的关系模式发生变化。6 岁时中央执行与视觉空间模板相关显著, 与语音环路相关不显著; 从 7 岁开始, 三个子系统彼此呈现中等程度相关。偏相关分析表明, 在控制中央执行的变异之后, 在各个年龄语音环路和视觉空间模板的相关都不显著(6 岁: $pr = .07$, $p = .679$; 7 岁: $pr = .08$, $p = .487$; 8 岁: $pr = .20$, $p = .122$; 9 岁: $pr = .24$, $p = .124$); 在控制语音环路之后, 中央执行与视觉空间模板仍然有显著的相关(6 岁: $pr = .33$, $p = .044$; 7 岁: $pr = .38$, $p = .001$; 8 岁: $pr = .30$, $p = .021$; 9 岁: $pr = .33$, $p = .029$); 控制了视觉空间模板之后, 除了六岁组以外, 中央执行与语音环路的相关仍然显著或

表 3 6-9 岁儿童工作记忆三个子系统之间的相关系数

	6 岁	7 岁	8 岁	9 岁
PL - VSSP	.17	.24*	.37**	.37**
PL - CE	.30	.39**	.49**	.43**
VSSP - CE	.36*	.43**	.43**	.40**

注: PL 为语音环路。VSSP 为视觉空间模板。CE 为中央执行。

* $p < .05$ 。 ** $p < .01$ 。

接近于显著(6 岁: $pr = .26$, $p = .110$; 7 岁: $pr = .32$, $p = .006$; 8 岁: $pr = .40$, $p = .002$; 9 岁: $pr = .29$, $p = .062$)。

3.3 听力广度与工作记忆各子系统之间的关系

用结构方程模型(SEM)对听力广度、语音环路、视觉空间模板、中央执行及年龄之间的关系进行了探索。根据 Bentler 和 Wu(1995), Kurtosis 系数小于 3 时认为数据符合多元正态假设, 本研究中该值为 1.367, 可进行 SEM 分析。根据 Baddeley 理论, 语音环路和视觉空间模板是相对独立的存贮系统, 在中央执行的控制下工作。听力广度需要对信息进行同时加工和存贮, 需要中央执行参与, 但语音环路和视觉空间策略可能参与言语材料记忆, 因此它们之间关系可能如图 2。用 AMOS17.0 计算得出该模型各路径系数都达到显著水平。绝对拟合指标 χ^2 为 7.093, df 为 1, $\chi^2/df = 7.093$, $p < .05$, 相对拟合指标 $CFI = .947$, $RMSEA = .169$ 。一般来说, CFI 大小 .9, $RMSEA$ 小于 .1 (Steiger, 1990) 时模型拟合较好。这一模型对数据的拟合度不是很好。因为年龄对工作记忆各个子成分及听力广度有影响, 故将年龄添加到模型, 如图 3 所示。该模型绝对拟合指标 χ^2 为 3.743, df 为 1, $\chi^2/df = 3.743$, $p > .05$, 相对拟合指标 $CFI = .992$, $RMSEA = .113$ 。 $RMSEA$ 接近于

.1,而 χ^2/df 和CFI两项指标表明拟合较好,可接受该模型。图中可见当年龄因素提取出来后视觉空间

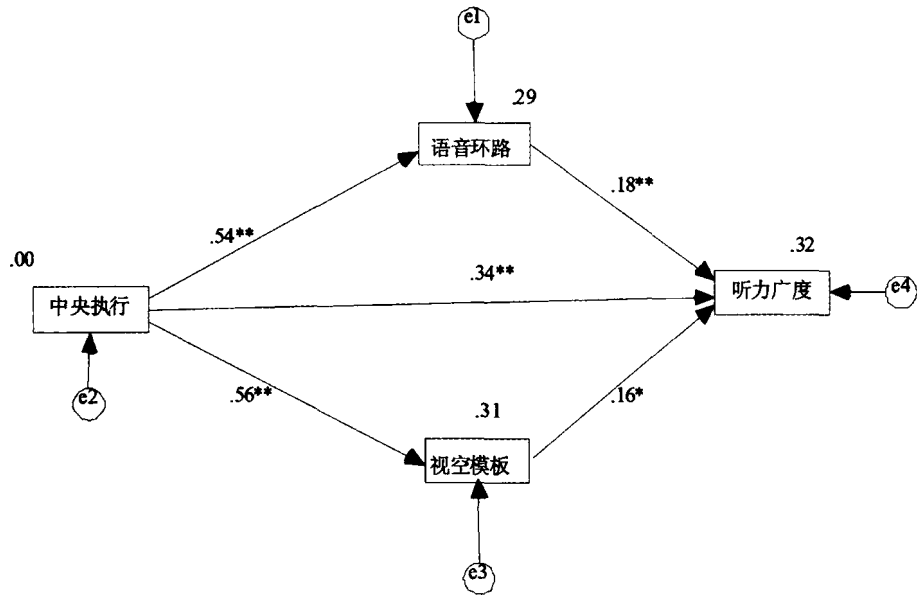


图2 听力广度与语音环路、视觉空间模板、中央执行的关系

注: * $p < .05$. ** $p < .01$.

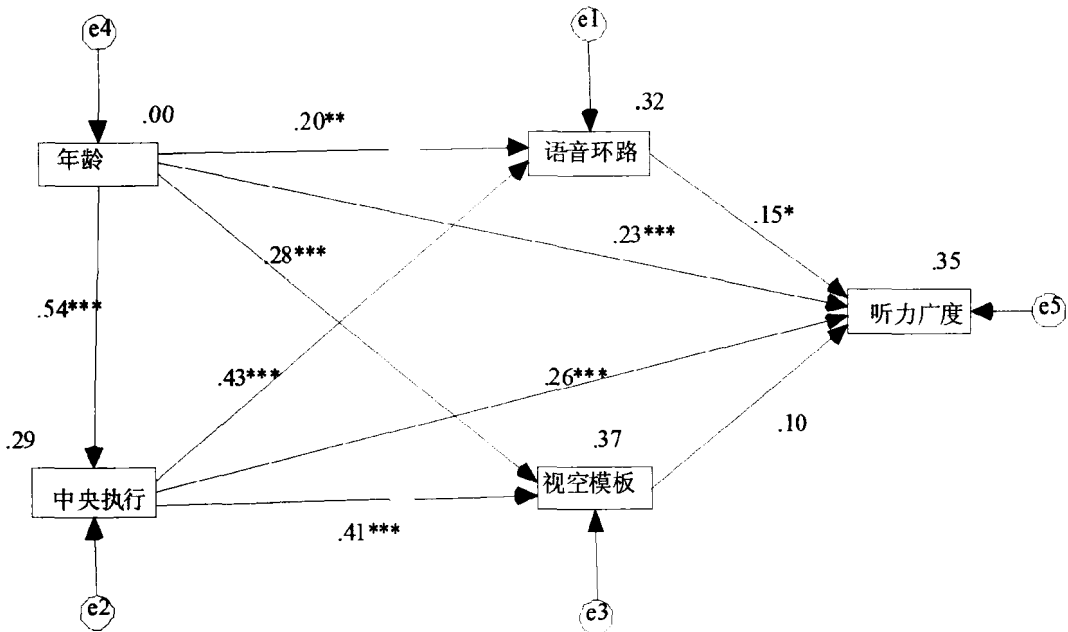


图3 听力广度与年龄、语音环路、视觉空间模板、中央执行的关系

* $p < .05$. ** $p < .01$.

4 讨论

工作记忆三个子系统在6-9岁之间持续发展,但发展速度并不一致,发展轨迹的分离表明其相对独立性。不同的发展速度既可能与大脑成熟的时间表有关,也可能受教育的影响。吴卫国和苏彦捷(2008)提出了教育因素可能对工作记忆各个子成分

的发展产生影响。例如儿童入学第一年,教师会进行注意力训练,以减少入学适应不良。

与每个子成分相对应的几种测量随着年龄变化速度的差异也暗示相应功能的相对独立。例如数字广度也比非词广度增长更快,可能是因为数字广度更易得益于组块策略的发展。与国外研究结果相一

致(Logie & Pearson, 1997),视觉模式广度发展比空间广速度快,这可能由于视觉模式比相继呈现的空间刺激更易形成组块或得益于复述机制。另一可能解释是工作记忆对视觉和空间信息有相对独立的加工过程,或存在两个不同的存贮成分,那么视觉广度与空间广度发展速度的差异也可能是由于其神经基础的发展速度差异所导致。

相关和偏相关分析结果也表明儿童语音环路和视觉空间模板是相对独立的子系统。在7-9岁之间,两个存贮子系统的功能表现出一定程度的相关,但当排除了中央执行的影响后,二者相关不显著。这意味着在儿童期中央执行功能参与了言语任务和视觉空间任务,支持Baddeley(2007)提出的中央执行负责协调信息在工作记忆中的流动以及控制从子系统中提取和传递信息的观点。由于本研究中视觉空间模板任务不涉及言语输入和输出,降低语音编码可能性,在语音环路任务中,采用听觉形式输入,降低视觉编码可能性,中央执行任务对存贮功能需求极低。因此,三个子成分之间相关更能够证明从儿童期开始,中央执行参与视觉空间及语音环路任务,而随着中央执行的成熟,执行成分和存贮成分之间相互联系的程度加强,支持Unsworth和Engle(2007)强调控制注意和从次级记忆中搜索信息能力的工作记忆模型,领域一般性的中央执行功能在认知加工中起到更为重要作用的观点。

Duff和Logie(2001)提出听力广度、阅读广度都与语音环路功能有关,而只有其加工部分才受到中央执行资源的支持。本研究证明儿童期听力广度也受到语音环路的影响。听力广度的很大一部分变异在结构方程模型中没有得到解释,也意味着可能存在其他重要变量,如加工速度或长时记忆等也影响听力广度。因此,可以推论使用言语复杂广度任务测量到的不仅是中央执行功能。由于本研究只测量了儿童的听力广度,还需要进一步研究空间或视觉复杂广度任务与工作记忆各个子成分关系。

5 结论

(1)工作记忆各个子系统功能在6-9岁之间均呈增长趋势,但各子系统发展速度不同。

(2)儿童语音环路、视觉空间模板是相互独立的存贮子系统。中央执行与二者的联系呈现发展的特征。随着年龄的增长,中央执行和两个存贮子系统之间相互联系的程度加强。

(3)儿童言语工作记忆广度既受中央执行影

响,也受语音环路的影响。

参考文献

- 段小菊,施建农,冉瑜英.(2009).8岁到成年期工作记忆广度的发展. *心理科学*, 32, 324-326.
- 陆爱桃,张积家,莫雷.(2008).注意控制和短时存储对音位流畅性和语义流畅性的影响. *心理学报*, 40, 25-36.
- 彭华茂,张凌,申继亮.(2009).工作记忆中央执行的老化. *心理科学*, 3, 67-70.
- 吴卫国,苏彦捷.(2008). *宁波大学学报(教育科学版)*, 30(4), 62-67.
- 杨雅颖,张富昌,高晓彩,王剑,孟祥辉.(2012).言语流畅性的特点及其与执行功能子成分关系的实验研究. *浙江大学学报(理学版)*, 39, 239-244.
- Alloway, T. P. & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106, 20-29.
- Baddeley, A. D. (2007). Working memory: Multiple models, multiple mechanisms. In H. L. Roediger, Y. Dudai, S. M. Fitzpatrick (Eds) *Science of Memory: Concepts*. (pp. 151-153) Oxford: Oxford University Press.
- Bentler, P. M. & Wu, J. C. (1995). *EQS for Windows User's Guide*. Encino, CA, Multivariate Software Inc.
- Chan, R. C. K., Wang, L., Ye, J., Leung, W. W. Y., & Mok, M. Y. K. (2008). A psychometric study of the Test of Everyday Attention for Children in the Chinese setting. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 23, 455-466.
- Duff, S. C., & Logie, R. H. (2001). Processing and Storage in Working Memory Span. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54A, 31-48.
- Fougnie, D., & Marois, R. (2011). What Limits Working Memory Capacity? Evidence for Modality-Specific Sources to the Simultaneous Storage of Visual and Auditory Arrays. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 37, 1329-1341.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177-190.
- Hulme, C., & MacKenzie, S. (1992). *Working memory and severe learning difficulties*. Hillsdale (NJ), England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Logie, R. H. & Pearson, D. G. (1997). The inner eye and the inner scribe of visual-spatial working memory: Evidence from developmental fractionation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 241-257.
- Steiger, J. H. (1990) Structural model evaluation and modification; an interval estimations approach. *Multivariate Behavioral Research*, 25, 173-180.
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). The nature of individual differences in working memory capacity: Active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological Review*, 114, 104-132.

Development of Working Memory from 6 to 9 Years of Age

Wang Xiaoli¹, Chen Guopeng², Ma Juanzi², Sun Xiuqing³, Sun Zhifeng⁴

(¹ School of Psychology, North West Normal University, Lanzhou, 730070)

(² School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai, 210062)

(³ Kangcheng Experimental School, Shanghai, 201100) (⁴ Institute of Education, Nanjing University, Nanjing, 210062)

Abstract Working memory capacity involves the ability of temporary storage and simultaneous manipulation of information. Baddeley and Hitch proposed that working memory can be divided into three subsystems; a phonological loop or storage of verbal and acoustic information; a visuo-spatial sketchpad providing its visual and spatial equivalent; and a central executive or a general system involved in focus of attention, divided attention, attention switching and communication with long-term memory. A substantial number of studies suggest that the structure of working memory in children is consistent with Baddeley's 3-subsystem model. Working memory is believed to be essential for a very wide range of complex cognitive tasks. Complex span tasks, like reading span, listening span, operating span, counting span, are usually used to measure working memory capacity development. However, the complex span tasks have not been fully understood and there has been a heated controversy about what they really measure. The aims of the current study is to examine the development of working memory through testing the function of working memory components based on Baddeley's model and to explore how these measurements are related to the complex span, commonly known as index of working memory capacity. A total of 225 students aged from 6 to 9 years old performed nine working memory tasks, including digit span, non-word span, visual pattern span, spatial span, focus of attention, divided attention, switching attention, semantic fluency test and listening span task, to examine their capacity of the phonological loop, the visuo-spatial sketchpad and the central executive respectively. The results showed that phonological memory, visuo-spatial storage and central executive functions grew with age at changing pace during 6 to 9 years of age. Post hoc tests demonstrated that phonological storage developed slowly from 6 to 8 and increased significantly between 8 and 9 years old, while visuo-spatial capacity experienced significant increase from 6 to 7, 7 to 8 years old and showed no significant difference between 8 and 9 years old. The results also suggested that three central executive functions, retrieval of long term memory, divided attention and focus of attention, witnessed significant increase between 6 and 7, 8 and 9 years old, while switching attention ability increased significantly from 6 to 7 years of age. Structural equation modeling analysis showed that both phonological loop and central executive positively affected the listening span. The overall pattern of results has important implications for understanding and measurement of working memory structure and capacity development in childhood. We conclude that both the capacity of the three subsystems of working memory and the relationship between them are changing during childhood, and both the central executive functions and phonological loop are involved in verbal working memory tasks.

Key words working memory, phonological loop, visuo-spatial sketchpad, central executive, development