

# 听障人群的工作记忆机制

陈可平 金志成 陈 骐

(华南师范大学心理应用研究中心, 广州 510631)

**摘要** 听障人群听觉通道受损, 使用手语交流, 提供了独特的切入点来探讨工作记忆的结构和功能。研究表明, 听障人群具备在功能上与正常人的语音环路平行的手语复述机制。通过发声训练, 听障人群也可采用语音编码, 即语音环路可被通达。听障人群具有与正常人相当的语言工作记忆资源, 但是这种资源在具体使用时受视觉通道处理特性的限制。越来越多的研究支持互补理论, 认为手语的使用增强了听障人群非语言的视空间处理能力。

**关键词** 听觉障碍; 工作记忆; 手语; 语音环路; 基于手语的复述环路

**分类号** B842.3

## 1 工作记忆定义及其发展

工作记忆 (working memory) 指在解决认知任务过程中, 用于信息加工并同时保持任务相关信息的系统或机制。工作记忆与我们的日常生活密切相关, 它在阅读理解、学习、推理和问题解决等高级认知活动中起着十分重要的作用 (Rudner & Rönberg, 2008)。经典的 Baddeley 工作记忆模型包括语音环路与视空间画板两个附属系统和一个中央执行系统 (Baddeley, 2002; Repovs & Baddeley, 2006)。近年来, 随着研究的深入, 此模型又增加了一个情景缓冲区 (episodic buffer, EB)。EB 是一个可用多维代码存储的系统, 为语音环路和视空间画板以及长时记忆之间提供了一个暂时的信息整合平台 (Baddeley, 2000)。Baddeley 工作记忆模型的丰富和深化对我们进一步研究工作记忆机制有着十分重要的意义。对于听力正常人群, 其工作记忆的语音环路依赖于听觉通道输入, 并与语言密切相关。然而对于听障人群, 视空间手语是其语言信息输入的基本方式, 因为手语的不可发声性和不可听性, 关于听障人群工作记忆机制的研究对传统的工作记忆模型提出了挑战。目前, 研究者们越来越关注工作记忆的结构在多大程度上受到感觉输入通道 (听觉和视觉) 和语言特性的

限制。

## 2 听障人群的工作记忆结构

### 2.1 听障人群基于手语的复述环路

工作记忆的语音环路负责对语音信息存储和控制, 它包括语音存储和发音复述两个子系统。语音存储负责对语音或言语材料进行保持, 但保持时间非常短暂, 大约为 2~4 秒。发音复述将书面语言转换为语音代码, 使其进入语音存储, 并通过复述来强化将要消退的语音信息使之保持下来 (Baddeley, 2002)。对正常人而言, 口语可以直接进入语音存储系统进行加工, 而听障人群由于听觉缺陷, 更多地通过手语进行交流, 与一般的视觉刺激相比, 手语和口语在音节、音韵、句法和语义等特征上具有同样复杂的水平, 都是一种用动作来表达的言语产出方式 (motorically expressed productive form)。因此手语刺激, 虽然是通过视觉呈现的, 却归于语言刺激而不是一般的视觉刺激。研究发现, 与正常人基于口语的语音环路相对应, 听障人群在视觉通道也能发展出一个基于语言的工作记忆结构, 被称为“基于手语的复述环路”(sign-based rehearsal loop)(Wilson, Bettger, Niculae, & Klima, 1997), 它与正常人的语音环路在功能上是平行的, 都负责各自感觉通道下的语言信息的加工处理。

听障人群基于手语的复述环路和正常人的语音环路有许多相似性。正常人群在对口语信息的加工处理中存在明显的语音相似性效应、词长

收稿日期: 2009-03-17

通讯作者: 金志成, E-mail: jinzhch@snu.edu.cn

效应、无关言语效应和发音抑制效应，而在听障被试中则突出显示了视觉的相似性干扰(Wilson, Bettger, Niculae, & Klima, 1997)。此外，基于手语的复述环路和语音环路在神经机制上也有许多相似之处。Bavelier等人(2008)采用fMRI技术研究了对美国手语(American Sign Language, ASL)和英语口语的加工是否具有相同的神经机制。实验中，先天使用手语的听障被试和先天使用英语的正常听力被试分别对通过手语和口语呈现的一系列字母进行编码、短期保持，并且按照刺激呈现的顺序进行回忆。结果发现，两组被试在额顶区域(包括背外侧前额叶、额下回、背侧下顶皮层、脑岛、扣带回皮质和辅助运动区)以及尾状核头部、丘脑和小脑有相同的神经激活区域。这证实了基于手语的复述环路和语音环路在功能上是平行的：二者对语言信息的编码、复述和回忆需要激活相同的神经回路，即这个神经回路的激活独立于语言呈现的方式。但是基于手语的复述环路和语音环路在处理手语和英语口语的神经机制上并不完全相同(Rönnberg, Rudner, & Ingvar, 2004; Rudner, Fransson, Ingvar, Nyberg, & Rönnberg, 2007)。一些研究者发现，听障人群和正常听力人群在工作记忆的编码、保持和回忆阶段，额顶区域的一些关键结构的激活程度并不相同。如在编码阶段，听障人群在额下回、前扣带回以及丘脑有较强的激活。在保持阶段，听障人群仅在额下回活动较强，而正常听力人群在双侧小脑和左侧颞中回的活动均较强。在回忆阶段，听障人群更依赖被动存储，其体素量是正常听力人群的近两倍之多(Bavelier, Newma, Mukherjee, Hauser, Kemeny, & Braun, 2008)。

在早期的心理学和特殊教育领域中，许多研究者发现，听障人群在标准阅读测验中的成绩低于正常人群(Harris & Moreno, 2004)，在语言理解和生成方面，显得呆板和不灵活。那么使用手语是否会阻碍听障人群的语言发展，使他们在语言理解和生成甚至在其他认知加工上落后于正常人呢？或者听障人群能否通过手语更好地理解语言并形成自身的思维方式呢？这个问题目前仍无定论。随着研究的深入，人们对工作记忆中语音环路的进化论意义有了更深入的理解。Baddeley等人进一步指出，语音环路真正的

功能在于语言的掌握(Boutla, Supalla, Newport, & Bavelier, 2004)。因此，通过比较听障人群基于手语的复述环路和听力正常人群语音环路的特性以及工作机制，我们可以进一步了解听障被试和正常人的语言理解和生成，从而揭示工作记忆的本质。

## 2.2 听障人群的语言编码方式以及对语音环路的通达

正常人在语言工作记忆中主要采用语音编码，而将视觉编码作为一种辅助的编码方式。许多研究发现，听障人群利用视空编码弥补了语音上的缺陷，将视觉的手语符号内化为自身的编码方式，即采用视觉编码来保持和处理语言工作记忆中的信息，发展出了非语音记忆的策略(Harris & Moreno, 2004; Olson & Caramazza, 2004)。有研究发现，在对字母的回忆中，正常听力被试容易产生语音上的错误，如把字母B记忆成了字母C，而听障被试则很少出现这种错误。相反，听障被试对字母的编码是基于字母的物理属性的，他们的错误往往是视觉上的混乱，如将字母R记忆成了字母P。但是这并不能说明，语音环路可以完全从听障人群的记忆策略中排除，经过语音训练，听障人群也会采用语音编码(Miller, 2002)。这种视觉性的语音记忆策略与发音动作和本体感觉密切相关，听障人群根据本体感觉所提供的有关语音的发音动作和运动觉信息，提高和增强了对语音信息的视觉加工能力。比如听障被试仍然能够学会拼音和对同音字作出正确的判断。在重度听障被试对文字材料的即时回忆实验中，研究者也发现了文字材料音和韵的作用。还有研究者发现，听障组和控制组被试在回忆系列呈现的实物素描画的成绩均优于无意义的涂鸦画，他们认为，听障被试和正常听力被试相似，都对素描画使用了语音编码策略(Arnold & Murray, 1998)。

对听障儿童进行发声训练有助于他们通达工作记忆中的语音环路。然而即使是通过发声训练后，听障人群具备了采用语音编码的能力，他们对语音编码的使用与正常听力人群仍有本质的不同(Emmorey, Mehta, & Grabowski, 2007; Miller, 2007)。Campbell和Wright(1990)研究了在即时回忆中被试对图片的语音编码程度，发现听障被试不会像正常听力被试那样自发地采

用图片一名称韵脚策略。在判断句子是否正确描述了图片上两个名称押韵物体的任务中,听障组儿童的成绩比正常同龄人要差,甚至低于听力正常的 5 岁儿童。Harris 和 Moreno (2004) 在一项研究中,将相同阅读年龄的正常儿童作为控制组,考察了听障儿童对语音编码的使用情况。研究发现,在单词拼写测试中,听障儿童的语音错误率显著低于控制组儿童;在判断某个单词是否符合拼写规则的测试(即正字法意识测试)中,听障儿童的成绩也显著低于控制组儿童。这说明,听障人群,尤其是听障儿童,语音缺陷使他们不能充分利用语音编码,即使他们的语言能力发展到了可以采用语音编码的程度,他们对语音编码策略的使用也不如正常人有效。

### 3 手语对听障人群工作记忆的影响

#### 3.1 手语对听障人群语言工作记忆的塑造

手语是听障人群交流的自然语言,具有其他人类自然语言的所有语言特性(Emmorey, 2002)。早期研究也证实了基于口语的语音环路和基于手语的复述环路在功能上的相似性。但是听觉和视觉在感知和表达这两种自然语言的能力上并不完全相同。语音环路基于听觉,而手语环路基于视觉,两种感觉通道有各自的处理局限。那么,不同的感觉通道对语言工作记忆会有什么影响呢?这个问题对于我们探讨听障人群基于手语的复述机制十分重要。

工作记忆是由短时记忆系统和控制加工系统两部分组成的,从机能的角度来考虑工作记忆,它对与活动有关的信息的暂时保持是以后复杂加工认知活动的前提,但是这种保持信息的工作记忆资源是有限的(Boutla, Supalla, Newport, & Bavelier, 2004)。比较广泛的测量短时记忆容量的任务是数字记忆广度测试,长期以来,魔力数字 7 加减 2 被认为是短时记忆的容量限制。最近,这种标准遭到了质疑。当在实验中使用不可用语音编码的材料时,测得的短时记忆的容量仅为 4~5。那么 7 加减 2 的高工作记忆容量是局限于语言材料,还是局限于由听觉通道输入的刺激?手语和口语具有相同的语言组织水平,但是感知和表达这两种语言的感觉通道并不相同,为研究这个问题提供了独特的条件。在一项研究中,研究者严格控制了口语的发音因素、拼写因

素以及手语的语音特性和持续时间,比较了听力正常人群和听障人群的语言工作记忆容量。结果发现,甚至当手语的表达速率高于英语时,先天使用手语的听障被试的手语工作记忆容量从未达到 7 加减 2,而是 5 加减 1(Boutla, Supalla, Newport, & Bavelier, 2004; Geraci, Gozzi, Papagno, & Cecchetto, 2008)。有两种可能的机制来区分手语信息和口语信息的存储:1)在语音环路中,语音信息的存储是早期的感觉存储,能够保持 2~4 秒,而视觉信息最多只能保持 1 秒(Bavelier, Newport, Hall, Supalla, & Boutla, 2006)。在不能进行复述的条件下,对语音信息的保持时间要比对手语信息的保持时间长。2)视觉和听觉对空间和时间信息的编码能力不同(Geraci, Gozzi, Papagno, & Cecchetto, 2008)。视觉通过空间位置将一个项目和另外一个项目区分开来,擅长处理同时呈现的信息,但是在处理相继呈现的项目信息上则较弱;相反,听觉擅长处理在时间上相继呈现的信息,弱于处理同时呈现的信息和解决空间问题。因此 7 加减 2 的高工作记忆容量并不适用于手语,语言工作记忆广度要受到语言信息输入的感觉通道的限制(Wilson, 2001)。

传统上对听障人群工作记忆容量的测量大多采用正序回忆任务,这种任务要求本身就对语音信息有利。然而当研究者对回忆信息的顺序进行控制时,发现,正常听力被试对语言材料的正序回忆成绩显著优于倒序回忆;从小使用手语的听障被试的正序回忆和倒序回忆成绩无显著差异。当实验要求被试对所保持的项目信息进行自由回忆时,正常听力人群和听障人群的成绩则无显著差异(Boutla, Supalla, Newport, & Bavelier, 2004)。说明听障人群和正常人群在保持和处理语言信息上具有相同水平的工作记忆资源,但是这种资源在具体使用时分别被各自感觉输入通道的处理特性所影响。正常人对口语的编码利用了听觉特征的优势,时间不可逆转,是单向性的,其工作记忆的复述机制也是单向性的,因此正常听力被试对语言材料的正、倒序回忆成绩差异显著;听障人群对手语的编码利用了视觉特征的优势,其复述机制则没有这种单向性的限制,所以他们的正、倒序回忆成绩则没有显著差异。综上所述,语言工作记忆由不同种类语言的共通之

处塑造,但仍然受到感觉输入通道处理特性限制(Wilson & Emmorey, 2003)。

### 3.2 手语对听障人群非语言工作记忆的塑造

对于听力正常人群,非语言的听觉工作记忆可利用口语的产生机制,如对音乐节奏和旋律的记忆。这表明语言会影响同一感觉输入通道的非语言的知觉处理,即在语言背景中发展出来的机制或技巧可以用来帮助完成非语言任务(Bavelier, Matthew, & Hauser, 2006)。那么对于使用手语的听障人群来说,他们的视空间工作记忆是否拥有非手语使用者所不具备的资源呢?缺陷理论(deficiency theory)认为,一种感觉的剥夺会导致另外一种感觉的缺陷。而互补理论(compensatory theory)认为,一种感觉的缺失会导致对剩余感觉通道更大的依赖,因此会增强剩余感觉通道的功能。越来越多的行为实验以及脑成像研究的结果显示,在测量感觉阈限和敏感性的视觉任务中,听障被试的非损伤通路,即视觉通路并未表现出敏感性的增加;但在执行与注意有关的视觉工作记忆任务时,听障被试的视觉通路显示出了出敏感性的增强。如,有研究发现,听障人群和正常人群在明度辨别、时间辨别、运动方向辨别、触觉频率辨别以及视觉搜索和定向等低水平视觉任务中的成绩无显著差异(Bavelier, Matthew, & Hauser, 2006)。但是在不同空间定向条件下,使用手语的听障被试比不会手语的正常听力被试能更好地加工面孔和视觉运动刺激,以及有更强的能力对客体产生相对复杂的表象和觉察镜像反转(Bellugi & Emmorey, 1993)。

手语对听障人群非语言工作记忆的塑造还表现在视空间工作记忆容量上。在早期研究中,对视空间工作记忆容量的测量大多采用 Corsi 任务。此测验包括了视觉和空间任务,要求被试对呈现在特定位置上的物体进行回忆和再现。有研究发现,在口语环境而不是手语环境中接受教育的听障儿童在 Corsi 任务中与听力正常儿童的成绩相当。而从小使用手语的听障被试和听力正常被试的空间工作记忆容量差异显著,使用手语的听障被试为 5.56,正常听力被试为 5(Wilson, Bettger, Niculae, & Klima, 1997)。这表明听障本身,以及对听觉缺陷的视觉代偿并不能导致视空间能力的增强。听障被试的视空间记忆优势源于

早期的手语使用经历。

有两种假设来解释听障人群增强的视空间处理能力:1)听障人群加强的空间语言表征能力有了非语言的用途。在空间工作记忆容量的测量任务中,使用手语的听障被试可能采用了视觉的语音编码策略来表征空间位置,这种策略与听力正常被试对非语言的声音刺激采用拟声的策略相类似。2)手语的使用在更普遍的意义上增强听障人群的视空间处理能力。换言之,手语信息的编码和加工使用空间关系定位,对空间能力的运用有很高的要求,从而造成听障人群空间处理能力的普遍增强,而不仅仅局限于空间语言能力的增强(Wilson, Bettger, Niculae, & Klima, 1997)。

以上研究结果也可以用工作记忆的结构来解释:在语音环路和基于手语的复述环路中,信息的表征存在重要不同,这些不同是由于听觉通道和视觉通道的不同处理特性造成的。工作记忆的结构可根据个体经历而灵活变通,可将它获得的语言资源和感觉资源扩大已有的复述机制。

## 4 问题与展望

听障人群是我们研究感觉剥夺以后工作记忆可塑性的良好范例,对工作记忆模型的丰富和深化也有着十分重要的意义。现有的关于听障人群工作记忆机制的研究大多基于 Baddeley 的工作记忆模型,但此模型是以正常人为研究对象提出来的,关于对特殊人群工作记忆机制的探讨,应立足于工作记忆结构的发展及其形态可塑性上,从动态发展的角度来衡量工作记忆的结构和功能,把工作记忆的研究向纵深推进。目前,此领域依然面临着一些亟待解决的问题。

(1)一些研究发现,听障人群在语言学习、阅读理解等高级认知任务的加工上发展滞后(Harris & Moreno, 2004)。我们认为,横向研究有其特殊的局限,纵向追踪研究不同程度听障儿童以及分别探讨早、晚期听觉剥夺对工作记忆各子成分的影响对于探讨听障人群认知发展规律十分必要。

(2)Baddeley 工作记忆模型中新近提出的情景缓冲区可以用于解释语言和视空间工作记忆之间的相互影响,然而目前尚未得到充分验证。听障人群针对手语的工作记忆结构——“基

于手语的复述环路”正是在视空间画板的基础上发展起来的,可以从情景缓冲区的角度来探讨其言语发生机制,以及结合基于手语的复述环路来研究工作记忆和长时记忆之间的关系,从而为 Baddeley 的工作记忆模型提供新的证据。

(3) 一些研究认为,和正常人群相比,听障儿童的语言学习和阅读理解能力发展缓慢,国外研究者发现学习字词与发音之间的关系是影响语言和阅读的重要策略,语音编码的程度在某种程度上反映了听障人群的阅读理解能力。在编码问题上,汉语与英语不同,其字形标记的不是声音而是词或词素的意义,因此对使用汉语的听障人群而言,语音编码对其阅读理解是否同样有关键性的作用?他们是怎样运用语音策略的?这些都是值得进一步探讨的问题。

#### 参考文献

- Arnold, P., & Murray, C. (1998). Memory for faces and objects by deaf and hearing signers and hearing nonsigners. *Journal of Psycholinguistic Research, 27*, 481-497.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences, 4*, 417-423.
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist, 7*, 85-97.
- Bavelier, A. D., Matthew, W. G., & Hauser, P. C. (2006). Do deaf individuals see better? *Trends in Cognitive Sciences, 10*, 512-518.
- Bavelier, D., Newport, E. L., Hall, M.L., Supalla, T., & Boutla, M. (2006). Persistent difference in short-term memory span between sign and speech: implications for cross-linguistic comparisons. *Psychological Science, 17*, 1090-1092.
- Bavelier, A. D., Newma, A., Mukherjee, M., Hauser, P., Kemeny, S., & Braun, A. (2008). Encoding, rehearsal, and recall in signers and speakers: shared network but differential engagement. *Cerebral Cortex, 18*, 2263-2274.
- Bellugi, U. O., & Emmorey, K. (1993). Enhanced spatial abilities in adult deaf signers. *Journal of Psycholinguistic Research, 22*, 153-187.
- Boutla, M., Supalla, T., Newport, E. L., & Bavelier, D. (2004). Short-term memory span: insights from sign language. *Nature Neuroscience, 7*, 997-1002.
- Campbell, R., & Wright, H. (1990). Deafness and immediate memory for pictures: dissociations between inner speech and the inner ear. *Journal of Experimental Child Psychology, 50*, 259-286.
- Emmorey, K. (2002). *Language, cognition and the brain—insights from sign language research*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Emmorey, K., Mehta, S., & Grabowski, T. J. (2007). The neural correlates of sign versus word production. *Neuroimage, 36*, 202-208.
- Geraci, C., Gozzi, M., Papagno, C., & Cecchetto, C. (2008). How grammar can cope with limited short-term memory: simultaneity and seriality in sign languages. *Cognition, 106*, 780-804.
- Harris, M., & Moreno, C. (2004). Deaf children's use of phonological coding: evidence from reading, spelling, and working memory. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 9*, 253-268.
- Miller, P. (2002). Communication mode and the processing of printed words: evidence from readers with prelingually acquired deafness. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 7*, 312-329.
- Miller, P. (2007). The role of spoken and sign languages in the retention of written words by prelingually deafened native signers. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 2*, 184-208.
- Olson, C. A., & Caramazza, A. (2004). Orthographic structure and deaf spelling errors: syllables, letter frequency, and speech. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 57*, 385-417.
- Repovs, G., & Baddeley, A. (2006). The multi-component model of working memory: explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience, 139*, (1), 5-21.
- Rönnerberg, J., Rudner, M., & Ingvar, M. (2004). Neural correlates of working memory for sign language. *Cognitive Brain Research, 20*, 165-182.
- Rudner, M., & Rönnerberg, J. (2008). Explicit processing demands reveal language modality-specific organization of working memory. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 13*, 466-484.
- Rudner, M., Fransson, P., Ingvar, M., Nyberg, L., & Rönnerberg, J. (2007). Neural representation of binding lexical sign and words in the episodic buffer of working memory. *Neuropsychologia, 45*, 2258-2276.
- Wilson, M. (2001). The case for sensorimotor coding in working memory. *Psychonomic Bulletin & Review, 8*, 44-57.
- Wilson, M., & Emmorey, K. (2003). The effect of irrelevant visual input on working memory for sign language. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 8*, 97-103.
- Wilson, M., Bettger, J. G., Niculae, I., & Klima, E. S. (1997). Modality of language shapes working memory: evidence from digit span and spatial span in ASL signers. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 2*, 150-160.

## Working Memory Mechanisms in the Deaf Population

CHEN Ke-Ping; JIN Zhi-Cheng; CHEN Qi

*(Department of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)*

**Abstract:** Deaf individuals use sign language to communicate in daily life because of their hearing deficits, which provides us a special opportunity to explore the structure and function of the working memory system. Previous evidence suggests that the deaf population develops a sign-based rehearsal loop which is comparative in many respects to the phonological loop in the hearing population. Besides, the phonological loop can be accessed by the deaf population through oral training, suggesting that the deaf individuals can use speech-based coding to a certain extent. Hearing speakers and deaf sign language users have comparable working memory resources during language use. But the resources will be restricted by the visual modality. More and more evidence provided supports to the compensatory theory, i.e., the use of sign language improves spatial abilities of the deaf.

**Key words:** deaf; working memory; sign language; phonological loop; sign-based rehearsal loop