

第一章 引言

言语知觉的研究表明，从婴儿生命的第一年开始，随着母语经验的增加，其语音辨别能力就表现出了引人注目的变化。然而，许多研究发现，言语知觉能力在儿童时期依然继续发展，直到青春期还没有完全成熟。较差的听觉加工能力缺陷一般都会伴随着较差的语言能力。Bishop 和 McArthur 2004 年的研究认为，听觉加工的缺陷一般潜藏在患有具体言语损伤的儿童中，例如阅读障碍。因此，早年关于言语加工能力的研究都关注的是阅读障碍儿童。关于阅读障碍的研究已经进行了近百年，但是其机制仍然不清楚。语音意识被广泛地认为是阅读障碍的核心缺陷。众多的研究者对阅读障碍的语音加工缺陷的原因提出了各种各样的理论进行解释，如视觉注意缺陷理论、听觉加工损伤理论、巨细胞理论，等等。除了对问题儿童的关注，研究正常儿童的发展轨迹也是本研究重要的组成部分，有必要研究出正常儿童听觉加工的发展特点，来描绘语言能力的发展轨迹。

虽然人们关于阅读障碍的了解越来越多，但是截至目前，直到儿童上学后，才能对阅读障碍做出诊断。有研究表明，早期的事件相关电位（event-related potentials, ERP）波形信息能够预测未来阅读相关能力的发展水平。如果想在早期对阅读障碍进行预测和干预，早期的听觉加工机制应该得到关注。为了排除注意、动机、加工策略等主观因素的影响，研究者们越来越多地采用 MMN 来探讨早期听觉加工和阅读障碍之间的关系。MMN 在非注意条件下出现，被认为是反映语音信息知觉自动化加工的一个非常好的指标。研究者不仅可以观察到更为客观的语音信息加工过程，更重要的是还可以考察反映语音辨别能力的脑机制加工情况，相对于已有范畴知觉的行为研究，可以提供更为丰富的结果。

言语信号中的信息既包含音段信息，也包含超音段信息。人们依靠音段信息来区分辅音和元音，进而进行词汇语义的加工。超音段信息则是指依附在音位、音节等语音单元之上，随时间发生变化的语音特征，包括音高（pitch）、音强（intensity）和时长（duration）等，表现为语调、重音和节奏等韵律特征。声调就是一种超音段特征，在汉语中具有区分语义的功能。西方音系的研究者都是考虑到自身语言的特点，选择其重要的音位特征进行研究，例如辅音的第二共振

峰、嗓音启动时间 (voice onset time, VOT)、时长等。声调信息的加工在以汉语为母语的人群中应该得到充分的研究和探索。

范畴化是言语知觉的一个显著特征,即刺激连续变化的物理属性被知觉为数量有限的范畴(音位)。行为研究表明,阅读障碍在范畴感知加工上存在缺陷,表现为对同一范畴内语音刺激的物理属性变化更加敏感,但是对不同范畴间语音特征变化则不够敏感^{①②}。声调的范畴化知觉研究依然停留在行为层面^{③④}。正常儿童声调范畴化知觉的发展模式是我们关注的问题。

因此,本研究采用 MMN 指标,一方面通过建立起儿童声调感知的 MMN 形态学、波幅、地形图等特征的发展变化情况,来探讨脑机制的发展变化,并且与辅音的发展做对比,结合行为测查,寻找 ERP 指标和行为指标之间的关系。另一方面试图通过声调范畴化知觉 MMN,探讨儿童声调范畴化加工的发展,以及其对阅读相关认知能力的预测作用。

全世界有几千种语言,其中使用人口超过 5000 万的仅有 13 种,汉语是作为母语使用人数最多的语言。与西方拼音文字相比,汉语极具特色且生命力极强,汉语的研究理应在世界言语感知领域占据一席之地,为言语感知的普遍性和特殊性提供重要的证据。本研究首先对声调典型刺激感知的发展轨迹进行描绘,并与辅音感知发展进行对比;其次对声调的范畴化知觉特点进行探讨,从而找到范畴化知觉对行为表现的预测关系。希望能够通过本研究对声调的感知及范畴化知觉有更加深刻的认识,从而使声调感知成为预测儿童阅读水平的可靠性指标。

① Bogliotti, C., Serniclaes, W., Messaoud-Galusi, S., & Sprenger-Charolles, L. (2008). Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *J Exp Child Psychol* 101 (2): 137-155.

② Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *J Exp Child Psychol* 87 (4): 336-361.

③ Francis, A. L., Ciocca, V., & Ng, B. K. C. (2003). On the (non) categorical perception of lexical tones. *Perception & Psychophysics* 65 (7): 1029-1044.

④ Halle, P. A., Chang, Y. C., & Best, C. T. (2004). Identification and discrimination of Mandarin Chinese tones by Mandarin Chinese vs. French listeners. *Journal of Phonetics* 32 (3): 395-421.

第二章 文献综述

一、言语感知、语音意识与阅读之间的关系

(一) 阅读发展的典型性特征

阅读常常被简单地认为只是一个视觉过程，但它其实是一个语言学过程^①——大脑将表征言语的视觉符号转化为语言学信息。因此，言语加工能力（speech processing skill）是阅读不可或缺的重要组成部分。语音编码技能（phonological recoding skills），即视觉符号到音的转化能力，在早期通过文字获得语义的过程中扮演了重要角色^②。这些能力在有些语言中发展非常迅速（如芬兰语的形音对应具有很高的 consistency，学习三个月就能掌握读音规则）^{③④}，在有些形音对应规则高度不一致的语言中发展相对缓慢（如英语的整词识别策略非常有用）。语音意识（在词语中能识别音素构成的能力）的个体差异能够在所有语言中预测语音编码能力的发展（见图 2-1）^⑤。而在正常发展的儿童中，视觉加工（如视觉空间能

① Frost, R. (2012). A universal approach to modeling visual word recognition and reading: Not only possible, but also inevitable. *Behavioral and Brain Sciences* 35 (5): 310-329.

② Seymour P. H., Aro, M., & Erskine, J. M. (2003). Foundation literacy acquisition in European orthographies. *British Journal of Psychology* 94 (2): 143-174.

③ Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin* 131 (1): 3.

④ Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Faisca, L., et al. (2010). Orthographic depth and its impact on universal predictors of reading a cross-language investigation. *Psychological Science* 21 (4): 551-559.

⑤ Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin* 131 (1): 3.

力) 的个体差异仅仅偶尔与阅读能力相关^{①~③}。

通过跨语言的研究我们可以推测出, 大多数儿童经过五六年的在校学习才能获得流畅阅读的能力。在大约 10 岁之后, 跨语言的读写能力发展情况与社会和经济水平等因素相关。在各种语言中, 阅读障碍的发病率约为 7%, 且似乎与社会和经济水平因素无关。在对世界各种语言的研究中可以发现, 语音编码 (phonological recoding) 的困难是阅读障碍的核心缺陷^{④⑤}。有一个主流观点认为, 语音编码的困难来源于神经水平上心理词典的语音表征受损^{⑥⑦}。表征的问题进而导致了语音意识的问题。由于从婴儿期开始语音的习得是多元的, 听觉学习依赖于唇和脸提供的视觉信息和说话提供的运动信息^⑧的支持, 原则上视觉和听觉的感知缺陷能够导致跨语言的语音缺陷。图 2-1 为言语知觉的各个层次。

Phonological level	Oscillatory frequency (EEG band)	Example(s)	Age at which reflective awareness develops
Intonational phrase	~1Hz and lower	Who's a pretty boy then?	Not yet ascertained
Stressed syllable	~2Hz (delta)	PE-ter PI-per PICKED a PECKof PICK-led PEPP-ers	Not yet ascertained
Syllable	~5Hz (θ)	• an-i-mal • wig-wam	2-3years
Onset-rime	~cued by rising θ -slope	• c-at • str-eam • cl-amp	3-4years
Phoneme	~35Hz(γ)	c-l-a-m-p	With alphabetic tuition

图 2-1 言语知觉的各个层次^⑨

① Vellutino, F. R. (1979). Dyslexia: Theory and research. Cambridge, MA MIT Press.

② Huang, H. -S. , & Hanley, J. R. (1995). Phonological awareness and visual skills in learning to read Chinese and English. *Cognition* 54 (1): 73-98.

③ McBride-Chang, C. , Zhou, Y. , Cho, J. -R. , Aram, D. , Levin, I. , & Tolchinsky, L. (2011). Visual spatial skill: A consequence of learning to read? *J Exp Child Psychol* 109 (2): 256-262.

④ Ziegler, J. C. , & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin* 131 (1): 3.

⑤ Ziegler, J. C. , Bertrand, D. , Tóth, D. , Csépe, V. , Reis, A. , Faisca, L. , et al. (2010). Orthographic depth and its impact on universal predictors of reading a cross-language investigation. *Psychological Science* 21 (4): 551-559.

⑥ Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia*. 2nd ed. Oxford: Blackwell Publishers.

⑦ Swan, D. , & Goswami, U. (1997). Picture naming deficits in developmental dyslexia: The phonological representations hypothesis. *Brain and Language* 56 (3): 334-353.

⑧ Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition; Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience* 5 (11): 831-843.

⑨ Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1): 43-54.

基本的感知能力与阅读能力之间的作用是相互的。阅读经验稀少的儿童,其阅读相关能力的发展与其他儿童相比会越来越差,差距越来越大。例如,视觉搜索 (visual scanning) 能力、眼动控制 (oculomotor control) 能力及相关的视觉空间注意 (visuospatial attention) 能力都很少得到锻炼,语音编码能力本身也是一样。长此下去,儿童很快就开始表现出感知加工的问题。在认知领域有一个共识:“rich get richer”。阅读多的儿童发展出更大的词汇量,反过来促进其语音编码能力^①。阅读经验的影响也许随着语言特点的变化而变化。例如,阅读透明语的儿童比阅读不透明语的儿童的字母空间系列加工能力得到了更多的锻炼。因此,阅读障碍的感知功能缺陷在不同的语言中都会出现,只是它的影响应该随语言正字法和语音特点的不同而发生系统的变化。

在阅读研究的领域,儿童语言能力发展的研究一直以来都受到研究者广泛的关注和兴趣。儿童识字能力和阅读能力的发展主要依靠上学后的不断学习,但是儿童对语音的感知往往发生得很早。婴儿从出生开始就暴露在母语的环境中,对语音进行加工。根据婴儿6个月时的语音分辨能力可以预测其2岁时的语言能力^②。早期的语音意识对儿童上学后的阅读能力已经有一定的预测作用^{③~⑥}。语音意识在阅读中的重要作用,最初是在对阅读障碍进行研究中发现的。大量针对西方拼音文字的研究表明,语音加工缺陷是阅读障碍儿童的核心缺陷^⑦。阅读障碍和SLI儿童的高致病率,以及该问题对儿童发展的广泛影响,也使得儿童语音能力研究充满意义。除此之外,研究儿童的言语知觉还能帮助我们了解人类的语言加工能力是如何习得的,同时也能帮助我们了解文化对语言习得的重要影响。

了解言语知觉能力的发展过程是非常有实际意义的。第一,儿童词汇量的增长会影响语言在儿童大脑中的表征;第二,开始学习阅读之后,书写系统和语音

① Stanovich, K. E. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly* 21 (4): 360-407.

② Tsao, F. M., Liu, H. M., & Kuhl, P. K. (2004). Speech perception in infancy predicts language development in the second year of life: A longitudinal study. *Child Dev* 75 (4): 1067-1084.

③ Chow, B. W.-Y., McBride-Chang, C., & Burgess, S. (2005). Phonological processing skills and early reading abilities in Hong Kong Chinese kindergarteners learning to read English as a second language. *Journal of Educational Psychology* 97 (1): 81.

④ Ho, C. S.-H., & Bryant, P. (1997). Phonological skills are important in learning to read Chinese. *Dev Psychol* 33 (6): 946.

⑤ Hu, C.-F., & Catts, H. W. (1998). The role of phonological processing in early reading ability: What we can learn from Chinese. *Scientific Studies of Reading* 2 (1): 55-79.

⑥ McBride-Chang, C., Bialystok, E., Chong, K. K., & Li, Y. (2004). Levels of phonological awareness in three cultures. *J Exp Child Psychol* 89 (2): 93-111.

⑦ Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: Specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology* 13 (2): 212-218.

表征会互相影响；第三，儿童暴露在母语的环境中进行自动化的学习，在发展出类似于成人的言语知觉能力之前，一定有一个不成熟的阶段。已有研究发现了许多与言语知觉相关的认知能力，例如，儿童对快速呈现的听觉刺激的表征能力，这种能力直到青春期还没发展完全^{①~③}，然而，也有一些研究没有发现儿童和成人的差异^④，这些研究结果的不一致督促我们利用大年龄跨度的横断研究对这一问题进行深入探讨。非声调语言的加工已经有了一些研究结果^⑤，但是声调语言的相关研究还非常稀少。我们的研究能够补充这一研究空白，探索文化背景对语言发展轨迹的影响作用。

汉语中语音意识对阅读的影响作用如下。

语音意识对汉语阅读的作用仍然是一个很有争议的话题。Huang 和 Hanley 1994 年的报告称，英国儿童的语音意识与阅读能力显著相关，但是汉语儿童语音意识与阅读能力的相关不显著。中国台湾的一组研究发现，儿童早期的语音意识只能解释一年之后 0.06% 的阅读能力变异。也有研究发现汉语儿童早期的语音意识对阅读具有预测作用，例如 Ho 和 Bryant 1997 年的报告称，经过四年的追踪研究，语音意识对阅读的发展具有显著的预测作用。研究结果不一致的原因有以下两点：第一，研究者使用的任务和测试的关注点不同；第二，汉语与西方拼音文字相比差别较大。西方拼音文字的语音意识经典任务是音位删除。但是，汉字的深层正字法属性使得儿童无法像西方字母语言一样对逐个部分进行发音^{⑥⑦}。这就导致了音位删除任务在汉语儿童中可能不具有敏感性。汉语研究者使用的另一个语音意识任务是音节删除任务。入学后，汉语儿童经过 8 周的拼音学习，逐渐对语音小单元熟悉起来；与此同时，他们在音节意识任务上的表现达

① Dawes, P., Bishop, D. V., Sirimanna, T., & Bamiou, D. -E. (2008). Profile and aetiology of children diagnosed with auditory processing disorder (APD). *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 72 (4): 483-489.

② Hall III, J. W., & Grose, J. H. (1994). Development of temporal resolution in children as measured by the temporal modulation transfer function. *J Acoust Soc Am* 96 (1): 150-154.

③ Hartley, D. E., Wright, B. A., Hogan, S. C., & Moore, D. R. (2000). Age-related improvements in auditory backward and simultaneous masking in 6-to 10-year-old children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 43 (6): 1402-1415.

④ Medina, V., Hoonhorst, I., Bogliotti, C., & Serniclaes, W. (2010). Development of voicing perception in French: Comparing adults, adolescents, and children. *Journal of Phonetics* 38 (4): 493-503.

⑤ Bishop, D. V., Hardiman, M. J., & Barry, J. G. (2011). Is auditory discrimination mature by middle childhood? A study using time-frequency analysis of mismatch responses from 7 years to adulthood. *Dev Sci* 14 (2): 402-416.

⑥ DeFrancis, J. (1989). *Visible speech: The diverse oneness of writing systems*. Honolulu: University of Hawaii Press.

⑦ Zou, L., Desroches, A. S., Liu, Y., Xia, Z., & Shu, H. (2012). Orthographic facilitation in Chinese spoken word recognition: An ERP study. *Brain and Language* 123 (3): 164-173.

到天花板水平^{①②}。已经有大量的研究表明,语音意识对汉语阅读的发展具有重要作用。例如,一个汉语刺激输入的计算机模拟研究表明,随着训练试次的增加,语音层在汉语形到音的转化过程中起到了非常重要的作用^③。在对汉语阅读障碍的相关研究中,刘文理等人比较了阅读障碍儿童、年龄控制组儿童和成人对VOT的范畴化知觉加工,结果发现,阅读障碍儿童的语音范畴更差,他们对范畴内的典型语音识别率低于正常儿童和成人^④。Cheung等人也采用识别任务探讨了阅读障碍儿童对声调和VOT的加工,结果发现,在对声调连续体的识别上,阅读障碍儿童的识别曲线斜率显著低于年龄控制组儿童;在对VOT连续体的识别上,也发现了类似的结果^⑤。这些研究都在一定程度上反映出语音意识在汉语阅读中所起到的重要作用。因此,发展出与汉语特点相匹配的语音意识任务显得尤为重要。

(二) 阅读障碍的语音加工缺陷理论

语音意识是指对语音表征进行感知、切分和操纵的一种能力^⑥。在西方拼音文字中,它被认为能够稳定地预测儿童早期的阅读能力^{⑦⑧}。儿童在学前通过学习形音对应,逐渐提高了语音解码能力。在开始进行阅读之后,阅读反过来又对语音意识的发展起到促进作用。语音意识的发展是一个从大单元到小单元的发展

① Shu, H., Peng, H., & McBride-Chang, C. (2008). Phonological awareness in young Chinese children. *Dev Sci* 11 (1): 171-181.

② Treiman, R., & Zukowski, A. (1991). Levels of phonological awareness. *Phonological processes in literacy: A tribute to Isabelle Y. Liberman*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum: 67-83.

③ Yang, J., Shu, H., McCandliss, B. D., & Zevin, J. D. (2013). Orthographic influences on division of labor in learning to read Chinese and English: Insights from computational modeling. *Bilingualism: Language and Cognition* 16 (2): 354-366.

④ Liu, W., Shu, H., & Yang, Y. (2009). Speech perception deficits by Chinese children with phonological dyslexia. *J Exp Child Psychol* 103 (3): 338-354.

⑤ Cheung, H., Chung, K. K., Wong, S. W., McBride-Chang, C., Penney, T. B., & Ho, C. S. (2009). Perception of tone and aspiration contrasts in Chinese children with dyslexia. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 50 (6): 726-733.

⑥ Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 61 (1): 129-141.

⑦ Bradley, L., & Bryant, P. (1983). Reading-skills and categorizing sounds - a causal study involving longitudinal prediction and intervention (Supported by the Ssrc). *Bulletin of the British Psychological Society* 36 (Feb): A4.

⑧ Perfetti, C. A., Beck, I., Bell, L. C., & Hughes, C. (1987). Phonemic knowledge and learning to read are reciprocal - A longitudinal-study of 1st-grade children. *Merrill-Palmer Quarterly-Journal of Developmental Psychology* 33 (3): 283-319.

过程^{①②}。研究者在阅读障碍及 SLI 儿童的相关研究中发现了语音意识的核心地位。

1. 语音表征假说

语音缺陷假说是发展性阅读障碍的一个重要理论，这个理论认为阅读障碍者对言语信息的表征、存储、提取存在语言特异性的损伤，使得他们无法习得良好的形音对应规则，从而造成了他们在阅读中的巨大困难^{③④}。许多研究都发现了发展性阅读障碍在语音加工技能上存在缺陷，尤其是在语音意识上存在缺陷^{⑤~⑦}。

经过三十多年的研究发现，阅读障碍儿童的我语音加工缺陷在行为上主要表现在三个方面：语音意识（phonological awareness）、语音短时记忆（verbal short-term memory）和词汇提取（lexical retrieval）^⑧。图 2-2 为阅读障碍语音加工理论。

语音意识是指对语音表征的识别、切分和操纵的能力^⑨。语音意识是预测发展性阅读障碍的关键因素。^⑩有研究发现，正常发展的儿童在学习书面语言之前就能把单词切分成更小的单元，如音节（syllable）或音位（phoneme），并且他们可以识别和操纵音位组成新的语音单元。但是阅读障碍儿童即使在学习了书面

① Stanovich, K. E. (1992). Speculations on the causes and consequences of individual differences in early reading acquisition. *Reading acquisition*, Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates: 307-342.

② Treiman, R., & Zukowski, A. (1991). Levels of phonological awareness. *Phonological processes in literacy: A tribute to Isabelle Y. Liberman*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum: 67-83.

③ Liberman, A., Harris, K. S., Eimas, P., Lisker, L., & Bastian, J. (1961). An effect of learning on speech-perception - The discrimination of durations of silence with and without phonemic significance. *Language and Speech* 4 (4): 175-195.

④ Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: Specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology* 13 (2): 212-218.

⑤ Bradley, L., & Bryant, P. E. (1978). Difficulties in auditory organization as a possible cause of reading backwardness. *Nature* 271 (5647): 746-747.

⑥ Morris, R. D., Stuebing, K. K., Fletcher, J. M., Shaywitz, S. E., Lyon, G. R., Shankweiler, D. P., et al. (1998). Subtypes of reading disability: Variability around a phonological core. *Journal of Educational Psychology* 90 (3): 347-373.

⑦ Stanovich, K. E. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly* 21 (4): 360-407.

⑧ Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading-skills. *Psychological Bulletin* 101 (2): 192-212.

⑨ Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 61 (1): 129-141.

⑩ Bradley, L., & Bryant, P. (1981). Visual memory and phonological skills in reading and spelling backwardness. *Psychological Research-Psychologische Forschung* 43 (2): 193-199.

语言以后,在完成这种任务时依然存在困难,不能很好地完成这种任务^①。

语音短时记忆是指对输入或输出的语音信息进行短暂的存储和操纵的能力。语音短时记忆的缺陷会导致阅读障碍儿童在加工语音信息时出现困难,从而导致他们在阅读上出现困难^②。有研究发现,阅读障碍儿童对记忆负载要求高的任务表现出加工困难^③。

词汇提取是指从长时记忆中提取语音表征的过程,一般通过快速命名任务进行考察。已有的研究发现阅读障碍儿童存在快速命名的缺陷,也就是快速通达和提取语音表征的缺陷^④。阅读障碍在命名速度上的困难发生得很早,在幼儿园时期就可以表现出来,这种困难会一直持续到小学阶段,甚至到成年^⑤。

阅读障碍者的语音加工缺陷都会表现为以上三个困难中的一个或几个。这三个因素之间是如何相互作用的,它们又是如何导致阅读障碍的呢?一个可能的原因是,语音意识、语音短时记忆和词汇提取都包含了语音表征。语音意识侧重于对语音表征的通达、注意和操控,它相当于对语音表征进行通达的中央控制器;语音短时记忆主要负责对语音表征的短时存储;词汇提取是从长时记忆中提取语音表征。总之,语音加工缺陷的三个主要方面都包含了语音表征。因此,研究者认为阅读障碍和语音表征的加工缺陷有关。研究者们普遍认为,阅读障碍的语音加工问题是由语音表征不好造成的。相对于正常人而言,阅读障碍者建立的语音表征模糊,语音表征粒度大,范畴化程度不高,对范畴内部的语音表征敏感度过高,

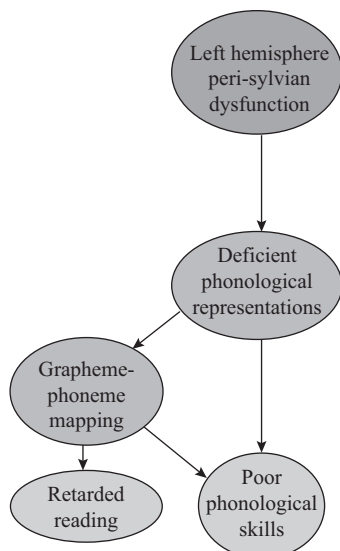


图 2-2 阅读障碍语音加工理论

注:最上面1个框是神经水平损伤,中间2个框是认知水平损伤,最下面2个框是行为水平损伤,箭头表示因果关联。

① Olson, R., Wise, B., Conners, F., Rack, J., & Fulker, D. (1989). Specific deficits in component reading and language-skills-Genetic and environmental-influences. *Journal of Learning Disabilities* 22 (6): 339-348.

② Pearson, P. D. (1999). A historically based review of preventing reading difficulties in young children. *Reading Research Quarterly* 34 (2): 231-246.

③ Baddeley, A. D., Ellis, N. C., Miles, T. R., & Lewis, V. J. (1982). Developmental and acquired dyslexia-A comparison. *Cognition* 11 (2): 185-199.

④ Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 61 (1): 129-141.

⑤ Meyer, M. S., Wood, F. B., Hart, L. A., & Felton, R. H. (1998). Longitudinal course of rapid naming in disabled and nondisabled readers. *Annals of Dyslexia* 48: 91-114.

保存了大量冗余的音位变体信息^{①~③}。

2. 语音通达假说

语音加工过程涉及多个水平和方面。例如,在 Szenkovits 和 Ramus (2005) 提出的语音加工模型中,语音加工过程包括语音输入、输出,以及词汇通路和亚词汇通路等不同水平。为了更好地区分阅读障碍的语音加工究竟是在哪个水平上存在缺陷,Ramus 等人进行了一系列的实验研究。他们采用真词和非词来探讨语音加工过程中的词汇通路和亚词汇通路,然后又通过重复任务(repetition tasks,包括输入和输出两个过程)和辨别任务(discrimination tasks,只包括输入过程)来比较输入和输出通路的语音表征。结果发现,在四个实验条件下,都产生了显著的组间差异,这说明阅读障碍者在各个水平的语音表征都存在问题,而在辨别任务上所表现出的更差的成绩,说明阅读障碍者在语音表征的输入水平上存在更大的困难^④。为什么阅读障碍者不能辨别语音信息?是语音表征的问题,还是短时记忆的问题?对此问题有两种观点:第一种观点认为,语音表征模糊,语音特征保留不完整,因此不能很好地进行比较;第二种观点认为,语音表征是好的,语音特征编码清晰,但是阅读障碍的短时记忆出了问题,从而导致阅读障碍在分辨任务上成绩较差。为了检验这两个理论,Ramus 等人采用语音相似性任务进行了研究。结果发现,语音表征问题在于短时记忆出现了问题。研究者总结了以往探讨阅读障碍语音表征损伤的研究,发现只是在特定条件下,语音损伤才表现为语音表征的问题,如短时记忆负荷高、有意识加工和时间限制等。因此,Ramus 等人提出了语音通达(phonological access)的概念,认为阅读障碍是在对语音表征的通达上存在问题。语音意识的任务需要对语音表征有意识的通达。快速命名任务需要对词汇语音表征进行快速通达。因此,阅读障碍在这些任务上的困难,很可能是由于语音通达出了问题。Ramus 等人试图通过“语音通达”这一概念来解释阅读障碍的语音加工缺陷,但是关于语音通达的加工机制还需要进一步探讨^⑤。

通过对阅读障碍近百年的研究,在阅读障碍各种各样的缺陷理论中,语音加工理论一直占据着主导地位。研究者认为,阅读障碍者对言语的表征、存储、提

① Adlard, A., & Hazan, V. (1998). Speech perception in children with specific reading difficulties (dyslexia). *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 51 (1): 153-177.

② Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *J Exp Child Psychol* 87 (4): 336-361.

③ Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia*. Inded. Oxford: Blackwell Publishers.

④ Szenkovits, G., & Ramus, F. (2005). Exploring dyslexics' phonological deficit I: Lexical vs sublexical and input vs output processes. *Dyslexia* 11 (4): 253-268.

⑤ Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 61 (1): 129-141.

取存在损伤,从而无法进行形音对应,造成了他们在阅读中的巨大困难^①。例如,正常儿童在学习书面语之前就能够将语音切分成词和音节,并能够将音节进行重组形成新的语音单元;而阅读障碍儿童即使入学以后,在完成类似任务上仍然存在困难^②。Giraud 和 Ramus (2012)在对阅读障碍进行基因、行为和脑的多层次研究后,提出阅读障碍的语音缺陷来源于基因突变导致的在大脑皮层颞叶的异常表达。但是,西方拼音文字的研究主要集中在对音位水平上音段信息的研究,如辅音的嗓音启动时间(VOT,如/b/、/p/)或者第二共振峰(如/b/、/d/、/g/)^③,对超音段信息(如声调)相关的研究非常少。在汉语中超音段的音位信息——声调的加工能力是如何影响阅读能力的,早期语音的加工能力能否对阅读水平进行预测,还需要进一步探讨。

(三) 阅读障碍的感知缺陷理论

在语音缺陷无法解释所有的阅读障碍的表现之后,研究者不满足于语音层面的解释,开始逐渐深入言语感知的底层神经机制进行探索,因此与语音加工缺陷理论最具竞争力的另一派阅读障碍缺陷理论——感知运动缺陷理论出现了。支持这一理论的一些研究表明,低水平的感知能力与阅读是因果关系,自下而上对声音属性(如频率的感知缺陷)导致了言语感知的困难,进而导致了语音表征能力较差。语音加工能力受损,从而导致阅读困难(for a review)^④。以下主要介绍感知运动理论中的三个主流理论:巨细胞理论、视觉加工理论和听觉加工理论。

1. 巨细胞理论

当视觉信息离开枕叶之后,主要传导给两个通路:背侧通路和腹侧通路。腹侧通路主要负责物体识别,背侧通路主要加工空间位置。相对于腹侧通路而言,背侧通路的发展更为缓慢,且包括皮层下的巨细胞系统。巨细胞系统负责感知运动,加工低频空间信息和高频时间信息,这些信息对于表征和解析视野十分重要。阅读障碍的巨细胞理论认为,巨细胞的视觉加工缺陷是阅读障碍的主要原因。

巨细胞理论最初由心理物理学和尸体解剖学发展而来。阅读障碍者表现出了认知功能的异常且外侧膝状体出现巨细胞。有研究表明,巨细胞缺陷扩张到背侧

① Liberman, A., Harris, K. S., Eimas, P., Lisker, L., & Bastian, J. (1961). An effect of learning on speech-perception-The discrimination of durations of silence with and without phonemic significance. *Language and Speech* 4 (4): 175-195.

② Olson, R., Wise, B., Conners, F., Rack, J., & Fulker, D. (1989). Specific deficits in component reading and language-skills-genetic and environmental-influences. *Journal of Learning Disabilities* 22 (6): 339-348.

③ Liberman, A., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology* 54 (5): 358-368.

④ Vellutino, F. R. (1979). *Dyslexia: Theory and research*. Cambridge, MA: MIT Press.

皮层系统后，会导致阅读障碍者在知觉随机点阵连贯运动时有缺陷，所采用的任务是双眼控制（binocular control）和其他巨细胞经典任务（frequency-doubling illusion）。这些研究认为，正是这种双眼聚焦（vergence control）控制困难导致了阅读障碍者阅读时将字母反转的效应。控制眼动的困难导致了视觉表征的不稳定和跳跃，从而导致了阅读困难。尽管所有的儿童在学习阅读的过程中都会经历字母反转的发展阶段，但是成像研究在阅读障碍儿童和成人身上看到了运动加工相关脑区神经活动的减弱。这些研究都支持了巨细胞理论。

关于巨细胞理论，前人做过一个训练的研究。这一研究使用神经成像技术测量阅读障碍者 V5（第五视觉区）在训练前后的激活情况，与年龄控制组和阅读水平控制组进行了对比（见图 2-3）。训练包含两种条件：一种是训练阅读相关能力；另一种是数学相关能力。在训练前，阅读障碍儿童的 V5 激活水平比年龄控制组更弱，与阅读水平控制组相同。在语音训练之后，阅读障碍儿童的阅读能力提高了，V5 的激活水平也有了提高。而且，数学训练既没有提高阅读水平，也没有增强 V5 的激活水平，这说明巨细胞功能与阅读之间的确有密切的关系^①。

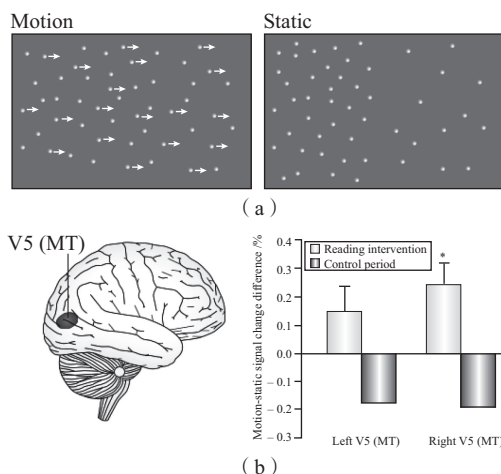


图 2-3 一致性运动感知和阅读障碍者第五视觉区的激活情况^②

尽管巨细胞理论名噪一时，它似乎只是识别出了与阅读经验有关的感知功能障碍，而非阅读障碍本身的原因。另外，背侧通路系统的不成熟似乎与一系列发展性障碍有关，包括阅读障碍、自闭症、威廉斯综合征和计算障碍^③。因此，背

① Olulade, O. A., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2013). Abnormal visual motion processing is not a cause of dyslexia. *Neuron* 79 (1): 180-190.

② Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1): 43-54.

③ Atkinson, J., King, J., Braddick, O., Nokes, L., Anker, S., & Braddick, F. (1997). A specific deficit of dorsal stream function in Williams' syndrome. *NeuroReport* 8 (8): 1919-1922.

侧缺陷并非阅读障碍特异性的缺陷。

2. 视觉加工理论

视觉环境展示给我们的信息量远远超过了我们能够进行有效加工的能力。视觉注意的巨大功能使我们能够选择性地加工与当前任务有关的信息，抑制无关信息。关于视觉注意与阅读障碍的关系有两个主流理论：一个是视觉注意广度损伤理论；另一个是视觉空间注意缺陷理论。

1) 视觉注意广度损伤理论

视觉注意广度是指能够将感知输入的信息在瞬间中断的时候进行保持的视觉信息量（如眨眼和扫视的时候）。视觉广度对于视觉的连贯体验来说非常重要。有理论认为，阅读障碍导致的视觉广度能力减弱和多元素加工能力的局限，使阅读能力受损^{①~③}。

视觉注意广度的典型测量方法是测查在注意窗口（视觉空间中选择性注意选定的范围）中能够被同时加工的元素数量。经典的广度任务是非常迅速地呈现五个元素（如五个字母或者数字），然后记录被试者对这五个元素或者其中某个线索位置的元素命名的反应时。通常来说，反应时展示出 M 型（在 1、3、5 的位置上反应更快），正确率展示出 W 型（在 1、3、5 的位置上正确率更高）。在第二、四位置上所表现出来的较慢速度和较差正确率反映了拥挤效应——视觉目标旁边的刺激对它产生了视觉干扰。

在这些相关的研究中，很重要的一点是，对于不同的刺激，感知缺陷会有什么样的特点。有两个研究使用了经典的五元素视觉广度任务^{④⑤}。刺激有两种：一种是字母和数字；另一种是符号和颜色。结果表明，对于字母和数字，障碍儿童比年龄控制组儿童的视觉广度更差；但是对于符号^⑥和颜色，两组儿童没有显著差异（见图 2-4）。以上研究说明，阅读障碍儿童的困难是在字母和数字这样的

① Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition* 104 (2): 198-230.

② Bosse, M. L., & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance: A cross-sectional study. *Journal of Research in Reading* 32 (2): 230-253.

③ Bosse, M. -L., & Valdois, S. (2003). Patterns of developmental dyslexia according to a multi-trace memory model of reading. *Current Psychology Letters* 1: 10.

④ Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Faisca, L., et al. (2010). Orthographic depth and its impact on universal predictors of reading a cross-language investigation. *Psychological Science* 21 (4): 551-559.

⑤ Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., & Lobier, M. (2012). Impaired letter-string processing in developmental dyslexia: What visual-to-phonology code mapping disorder? *Dyslexia* 18 (2): 77-93.

⑥ Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Faisca, L., et al. (2010). Orthographic depth and its impact on universal predictors of reading a cross-language investigation. *Psychological Science* 21 (4): 551-559.

刺激条件上，他们无法像正常儿童一样快速高频地进行声音编码。

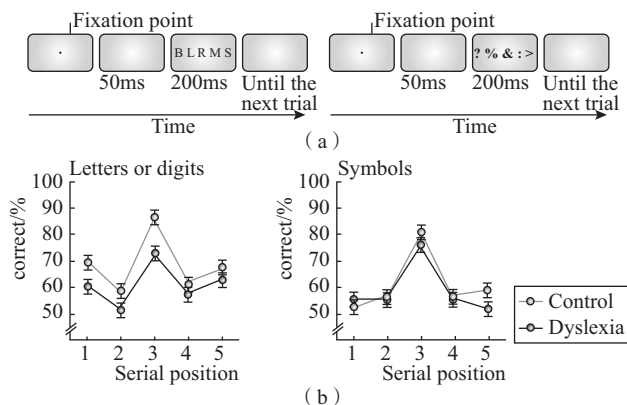


图 2-4 阅读障碍者在视觉广度任务上的表现^①

2) 视觉空间注意缺陷理论

第二个视觉注意理论是空间线索缺陷导致了阅读障碍^{②~④}。有效的注意系统能够根据外部线索迅速转移^⑤。外部线索的属性是独立于注意目标的（如阅读过程中的字母颜色），但是会有一个自动化感知的“线索效应”（cueing effect），有助于对目标刺激的感知及缩短注意转移的反应时，在不需要移动眼睛的情况下迅速对视野中最重要信息进行加工。

根据视觉空间主义理论，阅读障碍者的注意转移反应迟缓^⑥。阅读障碍者的大脑在形到音的编码过程中无法对周围字母进行抑制，从而实现平滑地在字母中移动。

经典的空间线索范式对比的是有效线索和无效线索。这些线索与目标刺激的间隔一般会有所变化。线索效应的表现是注意转移到目标刺激的速度更快，正确率更高。一系列意大利阅读障碍儿童的研究表明，阅读障碍儿童的空间注意转移

① Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1): 43-54.

② Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R., & Mascetti, G. G. (2003). The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain and Cognition* 53 (2): 181-184.

③ Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M. L., Molteni, M., Paganoni, P., et al. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology* 23 (6): 841-855.

④ Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., et al. (2010). Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience* 22 (5): 1011-1025.

⑤ Ross-Sheehy, S., Oakes, L. M., & Luck, S. J. (2011). Exogenous attention influences visual short-term memory in infants. *Dev Sci* 14 (3): 490-501.

⑥ Hari, R., Renvall, H., & Tanskanen, T. (2001). Left minineglect in dyslexic adults. *Brain* 124: 1373-1380.

能力受损（见图 2-5）^{①~④}。例如，一个研究包括了 22 名 10 岁的阅读障碍儿童，其中有 13 个阅读障碍儿童的语音编码能力较差，他们对 100ms 的线索没有表现出空间线索效应，在 250ms 的线索上表现出了缓慢的线索效应，但是该研究的阅读水平控制组能够利用 100ms 的线索。

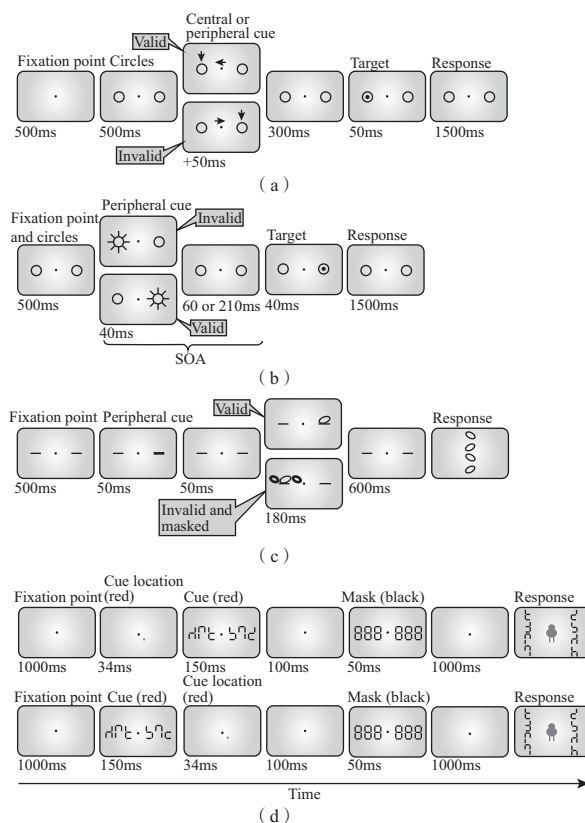


图 2-5 视觉空间线索任务^⑤

① Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M. L., Molteni, M., Paganoni, P., et al. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology* 23 (6): 841-855.

② Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., et al. (2010). Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience* 22 (5): 1011-1025.

③ Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Pedrolli, K., & Facoetti, A. (2012). A causal link between visual spatial attention and reading acquisition. *Current Biology* 22 (9): 814-819.

④ Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Viola, S., Molteni, M., & Facoetti, A. (2013). Action video games make dyslexic children read better. *Current Biology* 23 (6): 462-466.

⑤ Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1): 43-54.

综上所述,巨细胞理论和视觉注意理论殊途同归,都认为对于视觉文本的时间与空间分析(依赖于巨细胞,与顶叶皮层有关)受损是阅读障碍的原因^①。

3. 听觉加工理论

语言在根本上是一个听觉信号,听觉加工理论认为是听觉功能发展得不好导致了语音缺陷,语音缺陷是阅读障碍的根本特征。然而,语言信号非常复杂,我们对神经系统是如何加工语言的了解甚少。第一,对言语中韵律信息的感知从胎儿在子宫的时候就开始了。新生儿已经能够利用韵律特征辨别不同语言^②,新生儿出生不久就具备了对音位信息的敏感性^③。第二,在子宫里及出生后^④,皮层震荡机制作为言语编码的基础似乎在非常广泛的时间比率(a range of temporal rates)范围内起作用。第三,对言语信息的知觉组织能力发展非常缓慢,在发展过程中受到自上而下所学知识的指导^⑤。如果在感知和组织言语的听觉结构信息上存在缺陷,一定会影响到语音加工。

1) 快速听觉加工缺陷

快速听觉加工理论认为阅读障碍者对快速序列呈现的听觉信息加工存在困难^⑥。快速听觉加工理论(rapid auditory processing theory, RAP)关注的是光谱结构(如说话的人从发辅音到发元音这一运动的频率变化),与语言单元有关的光谱变化都十分迅速(fromant transition在40ms之内)。对SLI儿童的研究表明,SLI儿童加工快速听觉信息的能力比年龄水平控制组的儿童差。另一个后续的研究发现,在20个阅读障碍儿童中有8个出现了快速听觉加工缺陷,从而导致了阅读障碍的语音缺陷(见图2-6)^⑦。

① Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: A deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences* 14 (2): 57-63.

② Mehler, J., Jusczyk, P., Lambertz, G., Halsted, N., Bertoni, J., & Amiel-Tison, C. (1988). A precursor of language-acquisition in young infants. *Cognition* 29 (2): 143-178.

③ Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience* 5 (11): 831-843.

④ Telkemeyer, S., Rossi, S., Nierhaus, T., Steinbrink, J., Obrig, H., & Wartenburger, I. (2011). Acoustic processing of temporally modulated sounds in infants: Evidence from a combined near-infrared spectroscopy and EEG study. *Front Psychol* 2: 1-14.

⑤ Nittrover, S., & Lowenstein, J. H. (2013). Perceptual organization of speech signals by children with and without dyslexia. *Res Dev Disabil* 34 (8): 2304-2325.

⑥ Tallal, P. (2004). Opinion-Improving language and literacy is a matter of time. *Nature Reviews Neuroscience* 5 (9): 721-728.

⑦ Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1): 43-54.

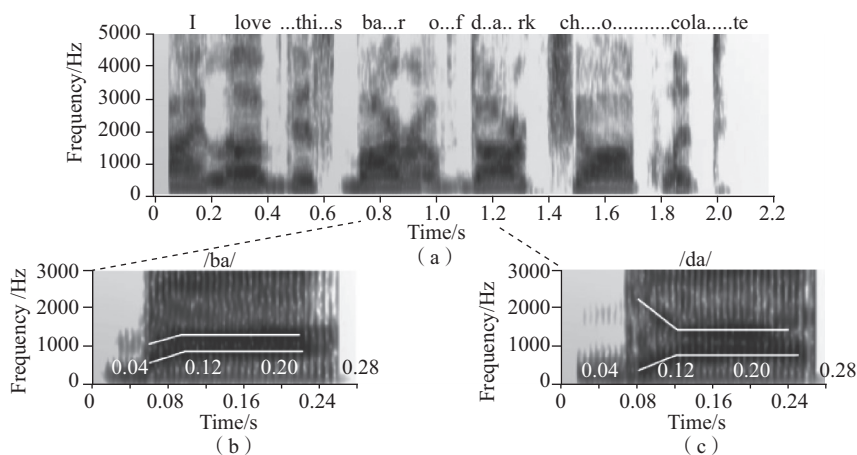


图 2-6 用听觉理论解释语言信息的加工举例

该理论提出后,大量的 RAP 研究涌现出来,具有代表性的一项研究利用电脑软件游戏训练成功地提高了儿童的 RAP 能力^{①②}。还有一个追踪研究显示,学前的阅读障碍风险儿童与年龄控制组儿童相比,大脑活动存在不同,具体表现为听快速频率转换(rapid frequency transitions)的非言语刺激左侧额叶激活减退^③。在更大年龄的儿童及成人阅读障碍的研究中采用 RAP 任务发现过类似的活动减退,这种大脑活动的异常支持了 RAP 理论。

利用合成的言语刺激所做的范畴化知觉研究报告了阅读障碍儿童更强的敏感性。^④在范畴化知觉任务中,阅读障碍儿童比年龄和阅读水平控制组儿童对范畴内刺激表现出更敏感的辨别能力^⑤。产生这样的结果是因为阅读障碍者保持着对所有音位变体的敏感性,而正常人的这一敏感性已经在婴儿时期就舍弃了^⑥。阅

① Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., et al. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (5): 2860-2865.

② Gaab, N., Gabrieli, J. D. E., Deutsch, G. K., Tallal, P., & Temple, E. (2007). Neural correlates of rapid auditory processing are disrupted in children with developmental dyslexia and ameliorated with training: An fMRI study. *Restorative Neurology and Neuroscience* 25 (3-4): 295-310.

③ Raschle, N. M., Chang, M., & Gaab, N. (2011). Structural brain alterations Meyer associated with dyslexia predate reading onset. *NeuroImage* 57 (3): 742-749.

④ Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *J Exp Child Psychol* 87 (4): 336-361.

⑤ Bogliotti, C., Serniclaes, W., Messaoud-Galusi, S., & Sprenger-CharolleS, L. (2008). Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *J Exp Child Psychol* 101 (2): 137-155.

⑥ Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience* 5 (11): 831-843.

读障碍者对音位变体的敏感与 RAP 神经活动的异常^①所说明的问题一致，阅读障碍者 RAP 神经活动的异常也许就反映了音位变体的加工。

2) 振幅调制缺陷

一个关于听觉时间维度加工 (temporal processing) 的更新的理论关心的是相对缓慢的信息，并且关心的是强度 (振幅) 而非频率 (音高)。Rise-time 理论认为，阅读障碍者在辨别缓慢变化的振幅包络线上升时间上有缺陷，进而影响了言语节奏和韵律 (rhythm and prosody) 的感知^{②③}。言语的振幅包络线是指缓慢变化的能量轮廓，包含了一系列不同时间比率下的振幅调制模式。在这些不同的时间比率下，Rise-time (到达调制波峰的时间) 是不同的。对儿童语言 (child-directed speech) 最新研究表明，这些慢速振幅调制模式是学前儿童发展出相对精细的语音意识的基础^{④~⑥}。三个主要的振幅调制比率在图 2-7 中有展示。

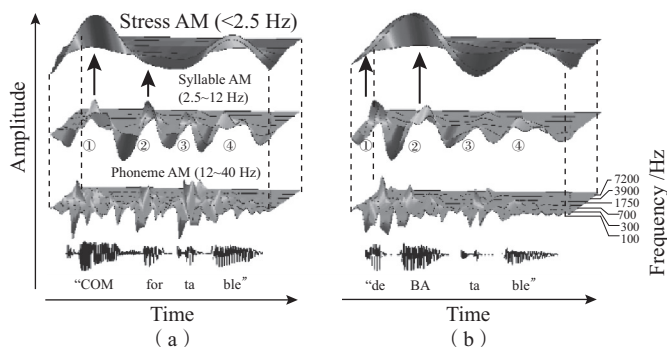


图 2-7 用听觉理论解释语言信息的加工举例^⑦

① Gaab, N., Gabrieli, J. D. E., Deutsch, G. K., Tallal, P., & Temple, E. (2007). Neural correlates of rapid auditory processing are disrupted in children with developmental dyslexia and ameliorated with training: An fMRI study. *Restorative Neurology and Neuroscience* 25 (3-4): 295-310.

② Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S., et al. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (16): 10911-10916.

③ Goswami, U., Wang, H. L. S., Cruz, A., Fosker, T., Mead, N., & Huss, M. (2011). Language-universal sensory deficits in developmental dyslexia: English, Spanish, and Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience* 23 (2): 325-337.

④ Leong, V. (2012). Prosodic rhythm in the speech amplitude envelope: Amplitude modulation phase hierarchies (AMPHs) and AMPH models. Cambridge, UK: PhD Thesis.

⑤ Leong, V., & Goswami, U. (2014a). Assessment of rhythmic entrainment at multiple timescales in dyslexia: Evidence for disruption to syllable timing. *Hearing Research* 308: 141-161.

⑥ Leong, V., & Goswami, U. (2014b). Impaired extraction of speech rhythm from temporal modulation patterns in speech in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience* 8: 96.

⑦ Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1): 43-54.

上升时间 (rise time) 与言语韵律和音节结构的知觉组织有关, 学龄儿童还没有发展出类似成年人的利用言语振幅调制结构的能力^①。一系列研究表明, 对于上升时间的辨别能力, 阅读障碍儿童比年龄水平控制组的儿童更差^{②~⑥}, 阅读障碍儿童与阅读水平控制组的儿童类似, 语音意识和上升时间敏感性存在显著相关。在一个追踪研究中发现, 4岁学前的英语儿童对上升时间的敏感性能显著预测其5岁时的韵律意识 (rhyme awareness)^⑦。另一个荷兰的追踪研究发现, 阅读障碍风险儿童学前对慢速频率调制的敏感性能预测之后的阅读能力和语音意识。相关训练研究同样支持上升时间理论。对阅读障碍和阅读较差的被试进行的研究发现, 行为的干预 (通过音乐、打鼓、行走和作诗增强对语言中韵律的感知) 提高了语音意识、阅读和拼写的能力。^{⑧⑨} 运动同步性是通过给音乐打节拍评估, 此能力的增强与阅读能力的增强显相关。

时间采样理论对这些研究结果做了解释^⑩。时间采样理论认为, 阅读障碍儿童对上升时间的感知能力较差, 导致其知觉慢速时间进程的言语振幅调制模式的能力受损 (见图 2-7)。上升时间这一属性作为听觉的重要线索, 重置了神经元振荡, 从而使得振荡的波峰与振幅调制波峰对齐。非典型振荡的对齐过程影响了振幅调制

① Nittrouer, S., & Lowenstein, J. H. (2013). Perceptual organization of speech signals by children with and without dyslexia. *Res Dev Disabil* 34 (8): 2304-2325.

② Goswami, U., Wang, H. L. S., Cruz, A., Fosker, T., Mead, N., & Huss, M. (2011). Language-universal sensory deficits in developmental dyslexia: English, Spanish, and Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience* 23 (2): 325-337.

③ Muneaux, M., Ziegler, J. C., Truc, C., Thomson, J., & Goswami, U. (2004). Deficits in beat perception and dyslexia: Evidence from French. *NeuroReport* 15 (8): 1255-1259.

④ Suranyi, Z., Csepe, V., Richardson, U., Thomson, J. M., Honbolygo, F., & Goswami, U. (2009). Sensitivity to rhythmic parameters in dyslexic children: A comparison of Hungarian and English. *Reading and Writing* 22 (1): 41-56.

⑤ Hämäläinen, J. A., Leppänen, P. H. T., Guttorm, T. K., & Lyytinen, H. (2008). Event-related potentials to pitch and rise time change in children with reading disabilities and typically reading children. *Clinical Neurophysiology* 119 (1): 100-115.

⑥ Poelmans, H., Luts, H., Vandermosten, M., Boets, B., Ghesquiere, P., & Wouters, J. (2011). Reduced sensitivity to slow-rate dynamic auditory information in children with dyslexia. *Res Dev Disabil* 32 (6): 2810-2819.

⑦ Corriveau, K. H., Goswami, U., & Thomson, J. M. (2010). Auditory processing and early literacy skills in a preschool and kindergarten population. *Journal of Learning Disabilities* 43 (4): 369-382.

⑧ Thomson, J. M., Leong, V., & Goswami, U. (2013). Auditory processing interventions and developmental dyslexia: A comparison of phonemic and rhythmic approaches. *Reading and Writing* 26 (2): 139-161.

⑨ Bhide, A., Power, A., & Goswami, U. (2013). A rhythmic musical intervention for poor readers: A comparison of efficacy with a letter-based intervention. *Mind Brain and Education* 7 (2): 113-123.

⑩ Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences* 15 (1): 3-10.

的知觉重组,即重音、音节和声母韵母三个层次的编码受到了坏的影响。这样,振幅调制困难在世界各种语言背景下都会影响语音能力。如果较高振荡层次包含了较差的波幅调制信息,就会在学习阅读时影响下游较小语音单元的识别(如音位)。

基于目前的研究,上升时间理论最有可能是阅读障碍的原因。如果在不同时间尺度上对原始语音结构的抽象要受到神经元的震荡同步化调节,且阅读障碍者对慢速变化的振幅调制比率同步化受到了损伤,那么阅读障碍者的心理词典从出生开始就会发展出一种不同的听觉组织方式^①。在此情况下,阅读障碍的语音表征将会发展得与正常人不同。这样发展下去,非典型的跟踪轨迹将会保护言语的加工,同时损伤书写系统的加工(如对应于一个字母的音位过多)^{②③}。

对上升时间及振幅包络线感知的神经机制研究能够通过 EEG 直接进行。EEG 研究表明,阅读障碍儿童的确对不同上升时间的振幅包络线表现出与年龄控制组模式不同的 ERP^④。这些儿童对 2Hz 的韵律音节串在神经同步化(neuro-nal entrainment)上有损伤,当听到一个扬声器有节奏地重复/ba/的时候,阅读障碍儿童表现出了在信息量较少的时间点进行相位的对齐,导致了低水平的言语表征质量^⑤。因此,神经同步化对儿童的音位信息编码具有重要影响,个体对相位的偏好与语音感知任务显著相关。

二、学龄儿童言语知觉的发展

(一) 失匹配负波 MMN

底层的听觉加工缺陷与高水平认知加工障碍互相牵连,长久以来混淆不清^⑥。关于听觉加工能力和认知发展的关系探讨,要先厘清听觉加工的发展。ERP 是反映听觉加工能力发展水平的比较好的神经生理指标。

① Bradley, L., & Bryant, P. E. (1978). Difficulties in auditory organization as a possible cause of reading backwardness. *Nature* 271 (5647): 746-747.

② Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *J Exp Child Psychol* 87 (4): 336-361.

③ Bogliotti, C., Serniclaes, W., Messaoud-Galusi, S., & Sprenger-CharolleS, L. (2008). Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *J Exp Child Psychol* 101 (2): 137-155.

④ Stefanics, G., Fosker, T., Huss, M., Mead, N., Szucs, D., & Goswami, U. (2011). Auditory sensory deficits in developmental dyslexia: A longitudinal ERP study. *NeuroImage* 57 (3): 723-732.

⑤ Power, A. J., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2013). Neural entrainment to rhythmic speech in children with developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience* 7 (777): 1-19.

⑥ Tallal, P., Stark, R. E., & Mellits, D. (1985a). The relationship between auditory temporal analysis and receptive language-development-evidence from studies of developmental language disorder. *Neuropsychologia* 23 (4): 527-534.

一个听觉刺激能够诱发一系列 ERP 波, 有特定的潜伏期和极性^①。最主要的反应是 N1, 大概在刺激呈现 100ms 之后出现, 持续 100ms 左右。N1 分布在额叶中部, 主要在听皮层产生 (for a review)^{②~⑦}。N1 被认为对刺激的比率敏感, 安静许久的 N1 波幅非常大, 当刺激不断重复时, N1 反应会逐渐减弱, 此时 ISI 会对 N1 有影响^{⑧~⑯}。

① Davis, H., & Zerlin, S. (1966). Acoustic relations of human vertex potential. *Journal of the Acoustical Society of America* 39 (1): 109-8.

② Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound—a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology* 24 (4): 375-425.

③ Elberling, C., Bak, C., Kofoed, B., Lebech, J., & Saermark, K. (1980). Magnetic auditory responses from the human-brain—a preliminary-report. *Scandinavian Audiology* 9 (3): 185-190.

④ Hari, R., Aittoniemi, K., Jarvinen, M. L., Katila, T., & Varpula, T. (1980). Auditory evoked transient and sustained magnetic-fields of the human-brain—localization of neural generators. *Experimental Brain Research* 40 (2): 237-240.

⑤ Pantev, C., Hoke, M., Lehnertz, K., Lutkenhoner, B., Fahrendorf, G., & Stober, U. (1990). Identification of sources of brain neuronal-activity with high spatiotemporal resolution through combination of neuromagnetic source localization (Nmsl) and magnetic-resonance-imaging (Mri). *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 75 (3): 173-184.

⑥ Papanicolaou, A. C., Baumann, S., Rogers, R. L., Saydjari, C., Amparo, E. G., & Eisenberg, H. M. (1990). Localization of auditory response sources using magnetoencephalography and magnetic-resonance imaging. *Archives of Neurology* 47 (1): 33-37.

⑦ Yamamoto, T., Williamson, S. J., Kaufman, L., Nicholson, C., & Llinas, R. (1988). Magnetic localization of neuronal-activity in the human-brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 85 (22): 8732-8736.

⑧ Budd, T. W., Barry, R. J., Gordon, E., Rennie, C., & Michie, P. T. (1998). Decrement of the N1 auditory event-related potential with stimulus repetition: Habituation vs refractoriness. *International Journal of Psychophysiology* 31 (1): 51-68.

⑨ Davis, H., Mast, T., Yoshie, N., & Zerlin, S. (1966). Slow response of human cortex to auditory stimuli—recovery process. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 21 (2): 105-113.

⑩ Hari, R., Kaila, K., Katila, T., Tuomisto, T., & Varpula, T. (1982). Interstimulus-interval dependence of the auditory vertex response and its magnetic counterpart—implications for their neural generation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 54 (5): 561-569.

⑪ Ioannides, A. A., Popescu, M., Otsuka, A., Bezerianos, A., & Liu, L. C. (2003). Magnetoencephalographic evidence of the interhemispheric asymmetry in echoic memory lifetime and its dependence on handedness and gender. *NeuroImage* 19 (3): 1061-1075.

⑫ May, P., & Tiitinen, H. (2004). Auditory scene analysis and sensory memory: The role of the auditory N100m. *Neurology and Clinical Neurophysiology* 19: 1-5.

⑬ Milner, B. A. (1969). Evaluation of auditory function by computer techniques. *International Journal of Audiology* 8 (2-3): 361-370.

⑭ Nelson, D. A., & Lassman, F. M. (1968). Effects of intersignal interval on human auditory evoked response. *Journal of the Acoustical Society of America* 44 (6): 1529-8.

⑮ Picton, T. W., Goodman, W. S., & Bryce, D. P. (1970). Amplitude of evoked responses to tones of high intensity. *Acta Oto-laryngologica* 70 (2): 77-82.

⑯ Picton, T. W., Woods, D. L., Baribeau-Braun, J., & Healey, T. M. (1977). Evoked potential audiometry. *Journal of Otolaryngology* 6: 90-119.

当 ISI 很小时 (小于 300ms), N1 就变得非常小, 很难辨识^{①②}, 这种 N1 波幅减弱的现象被解释为之前重复的刺激留下了记忆痕迹^{③~⑤}。当重复的单调的刺激被新异的刺激所打断时, 有趣的事情发生了。所谓 oddball 范式, 是指一个不同的刺激诱发了一个与多次重复的刺激相同的脑电波, 但是, 非常重要的是, 有一个显著增加的负成分在刺激呈现后 100~200ms 的时间段产生了。这一差别反应, 最初由 Butler 在 1968 年发现, 接下来由 Squires 和 Hillyard 在 1975 年描述出来, 又被 Snyder 和 Hillyard 在 1976 年支持, 证明了其反映的是匹配探测的功能。后来, Näätänen、Gaillard 和 Manysalo 在 1978 年用偏差刺激的波形减去标准刺激的波形, 产生了差异波, 并给 MMN 命名, 声称 MMN 反映了自动化的生理上的失匹配加工。这一加工, 是由于频繁出现的感觉刺激形成了一种刺激背景, 从而有了记忆的痕迹, 感觉输入的刺激与这一记忆痕迹有偏差。在此之后, MMN 就成了对于刺激改变进行加工的间接指标, 对其的分析来自对 ERP 数据的离线简单运算。

Näätänen 等人在 1978 年命名 MMN 时, 典型实验范式是在非注意条件下使用 Oddball 实验范式 (Oddball 实验范式一般过程: 对同一感觉通路序列呈现两种类型的刺激, 一种刺激出现的概率大, 如 80%, 称为标准刺激; 另一种刺激出现的概率小, 如 20%, 称为偏差刺激/靶刺激, 两种刺激随机出现), 如标准刺激设置为 1000Hz 的纯音, 偏差刺激设置为 800Hz 的纯音, 结果发现, 偏差刺激在 250ms 内均比标准刺激引起更高的负波^⑥。以偏差刺激引起的 ERP 减去标准刺激引起的 ERP, 在 100~250ms 可得到差异负波, 即 MMN, 它反映的是人脑在非注意的条件下对偏差刺激相对于标准刺激特征的变化的检测。MMN 被认为对偏差刺激在额叶中线中心有更大的负波, 在乳突有更大的正波。由于实验使用的偏差刺激与标准刺激的物理属性差别不大, 偏差刺激相对于标准刺激出现的概率又很小, 因此实际上偏差刺激是标准刺激的一种变化, 此差异波就是这一变

① Yabe, H., Tervaniemi, M., Reinikainen, K., & Näätänen, R. (1997). Temporal window of integration revealed by MMN to sound omission. *NeuroReport* 8 (8): 1971-1974.

② Yabe, H., Tervaniemi, M., Sinkkonen, J., Huottilainen, M., Ilmoniemi, R. J., & Näätänen, R. (1998). Temporal window of integration of auditory information in the human brain. *Psychophysiology* 35 (5): 615-619.

③ Lu, Z. L., Williamson, S. J., & Kaufman, L. (1992a). Behavioral lifetime of human auditory sensory memory predicted by physiological measures. *Science* 258 (5088): 1668-1670.

④ Lu, Z. L., Williamson, S. J., & Kaufman, L. (1992b). Human auditory primary and association cortex have differing lifetimes for activation traces. *Brain Research* 572 (1-2): 236-241.

⑤ Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound—a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology* 24 (4): 375-425.

⑥ Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mantysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked-potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)* 42 (4): 313-329.

化的反映。

一些研究发现, MMN 成分既可以反映言语刺激的范畴内变化, 也可以反映言语刺激的范畴间变化, 范畴内变化产生的 MMN 是对同一语音范畴内部物理属性差异的检测, 而范畴间变化产生的 MMN 主要反映对音位变化的检测^{①②}。MMN 被很多研究者认为是具有临床应用潜力的指标, 其出现早, 并且独立于注意的听觉辨别过程, 通过单一刺激的重复呈现并点缀稀少的物理偏差刺激诱发出来, 操作很简单。

对 MMN 的解释, 不同的研究者观点不同。Näätänen 认为, MMN 可以用两种方式进行解释^{③④}。根据记忆模型理论, MMN 反映的是对记忆机制的操纵, 对听觉环境的表征被用于神经对听觉改变的对比加工。另一种解释是适应性解释, 即新异输入模型。在该模型中, 对标准刺激敏感的神经群进入不应期, 当偏差刺激呈现时, 对偏差刺激敏感的神经群有很强的反应。

反对适应模型的研究有很多^{⑤~⑧}。这些研究提出了很多观点, 例如 MMN 发生得太晚了, 不可能是 N1; N1 和 MMN 的源定位不同; MMN 能够被其他类型的改变所诱发 (时间特征、刺激的抽象特征 duration 和 ISI), 甚至刺激的遗漏都能诱发 MMN。所以说, 对于 MMN 的解释应该是基于记忆的模型。N1 反映的是输入的、外源性的加工过程, 由皮层特征探测器的激活所产生。MMN 是源于一种复杂的内源性的认知过程, 反应了对听觉感觉记忆的一种操纵。这种清晰的功能性差别使得我们认为 N1 和 MMN 并不相同, MMN 应该是 ERP 的一种独立的成分, 所以对偏差刺激的反应应该是 N1 和 MMN 的混合体。这些对比都是基于一个基本的感觉分析假设, 即听觉刺激是由两个平行的通道进行分析的。

① Joannisse, M. F., Robertson, E. K., & Newman, R. L. (2007). Mismatch negativity reflects sensory and phonetic speech processing. *NeuroReport* 18 (9): 901-905.

② Sittiprapaporn, W., Tervaniemi, M., Chindaduangratn, C., & Kotchabhakdi, N. (2005). Preattentive discrimination of across-category and within-category change in consonant-vowel syllable. *NeuroReport* 16 (13): 1513-1518.

③ Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information-processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behavioral and Brain Sciences* 13 (2): 201-232.

④ Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

⑤ Näätänen, R., & Alho, K. (1995). Mismatch negativity-a unique measure of sensory processing in audition. *International Journal of Neuroscience* 80 (1-4): 317-337.

⑥ Näätänen R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin* 125 (6): 826-859.

⑦ Näätänen, R., Jacobsen, T., & Winkler, I. (2005). Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the evidence. *Psychophysiology* 42 (1): 25-32.

⑧ Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology* 118 (12): 2544-2590.

N1 通道会形成瞬时探测系统, 标记突然的能量改变, 如刺激的出现和消失。而特征探测系统则会编码刺激的完整物理特征, 编码的结果存入听觉感觉记忆系统。这一过程中对比的是刺激的物理特征, 如果存在差异, 结果就会出现 MMN。这样, 瞬时探测系统和特征探测系统的结果会被传输到执行控制机制, 导致注意的非自主专一。这一感觉分析过程被认为独立于注意, 是自动化的。

(二) 学龄儿童言语知觉 MMN 的发展

言语知觉研究能够帮助我们了解人类对语言的学习过程。婴儿言语知觉的研究最初是从 Eimas 开始的, 其和之后开展的许多研究发现, 婴儿期言语知觉能力的差别能够预测儿童期语言能力的发展水平^{①~④}。但是, 对 1~2 岁以上儿童的早期研究非常稀少。对学前和学龄儿童的研究发现, 他们的言语范畴化知觉能力 (speech categorization)、辨别能力 (discrimination) 和识别能力 (recognition) 都还未发展到成年人的水平^{⑤~⑧}, 儿童无法像成年人一样利用细微的线索完成识别和区分的任务^{⑨⑩}。当然, 也有许多研究没能发现年龄的发展效应^{⑪⑫}。

① Eimas, P. D., Siquelan, Er, Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science* 171 (3968): 303-8.

② Benasich, A. A., & Tallal, P. (2002). Infant discrimination of rapid auditory cues predicts later language impairment. *Behavioural Brain Research* 136 (1): 31-49.

③ Kuhl, P. K., Conboy, B. T., Padden, D., Nelson, T., & Pruitt, J. (2005). Early speech perception and later language development: Implications for the "Critical Period". *Language Learning and Development* 1 (3-4): 237-264.

④ Tsao, F. M., Liu, H. M., & Kuhl, P. K. (2004). Speech perception in infancy predicts language development in the second year of life: A longitudinal study. *Child Dev* 75 (4): 1067-1084.

⑤ Arai, T., Ohki, E., & Itaka, K. (2008). Perception of long vowels in Japanese by Children. *Acoustical Science and Technology* 29 (1): 106-109.

⑥ Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics* 28 (4): 377-396.

⑦ Sussman, J. E. (2001). Vowel perception by adults and children with normal language and specific language impairment: Based on steady states or transitions? *J Acoust Soc Am* 109 (3): 1173-1180.

⑧ Vance, M., Rosen, S., & Coleman, M. (2009). Assessing speech perception in young children and relationships with language skills. *International Journal of Audiology* 48 (10): 708-717.

⑨ Nittrouer, S., & Studdert-Kennedy, M. (1987). The role of coarticulatory effects in the perception of fricatives by children and adults. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 30 (3): 319-329.

⑩ Ohde, R. N., Haley, K. L., Vorperian, H. K., & McMahon, C. W. (1995). A developmental study of the perception of onset spectra for stop consonants in different vowel environments. *J Acoust Soc Am* 97 (6): 3800-3812.

⑪ Archibald, L. M. D., Joanisse, M. F., & Shepherd, M. (2008). Associations between key language-related measures in typically developing school-age children. *Zeitschrift Fur Psychologie-Journal of Psychology* 216 (3): 161-171.

⑫ Medina, V., Hoonhorst, I., Bogliotti, C., & Serniclaes, W. (2010). Development of voicing perception in French Comparing adults, adolescents, and children. *Journal of Phonetics* 38 (4): 493-503.

表面上看,在生命早期,婴儿识别母语特征的能力逐渐增强,而区分非母语特征的能力则逐渐减弱。婴儿时期对母语的这种偏好在某种程度上可以预测未来阅读技能的发展。然而,儿童语音感知能力似乎还是在婴儿期完全发展,而是在母语环境的影响和听觉系统成熟的过程中逐渐发展起来。神经解剖学研究中有证据表明,听觉区域的发展在儿童期经历了一个较长的过程。支持听觉和口语的听觉神经系统包括皮层下结构(包括听觉脑干)和皮层结构,它们的发展速度不同。一方面,从解剖生长的角度来看,听觉脑干的连接在妊娠第29周前后开始成熟,其髓鞘化在出生后的第一年内完成。听觉脑干树突的成熟发生在出生后的第6个月。另一方面,皮层下一皮层连接至儿童3~5岁时才成熟,而皮层的髓鞘化则持续到11~12岁。

语音感知能力在某种程度上也会因广泛阅读和写作经验而得到增强,学龄儿童尚未发展出成人水平的范畴感知能力,无法像成人那样使用细微的频谱线索。关于语音感知成熟的确切年龄,之前的研究者并未达成一致的结论。大多数以往的研究都是针对非声调语言进行的。然而,对于儿童到青春期和成年期的词汇声调感知能力发展轨迹的研究却非常稀少。

行为的研究需要儿童按照任务的要求做相应的反应,其过程包涵了许多一般的认知能力,包括动机、运动反应能力和行为策略等,这一过程必然受到很多因素的干扰。因此,行为任务本身不能单纯、准确地反映出儿童的言语知觉能力。在这种情况下,虽然对于MMN的理论解释还有争论,但是大量的认知研究已经开展起来。MMN的波幅值与行为的辨别能力相关^{①②}。经过短暂的训练,MMN的波幅值能够显著增加^{③④}。这些研究都在一定程度上说明MMN是言语知觉敏感性的指标。除MMN之外,另一个能够被新异刺激诱发出来的指标是晚期MMN成分,也叫晚期辨别负波(LDN),这一成分首次于1995年被Korpilahti等研究者在对儿童的实验中报告出来。这一成分的时间窗比MMN更晚一些,为

① Bradlow, A. R., Kraus, N., Nicol, T. G., McGee, T. J., Cunningham, J., Zecker, S. G., et al. (1999). Effects of lengthened formant transition duration on discrimination and neural representation of synthetic CV syllables by normal and learning-disabled children. *J Acoust Soc Am* 106 (4): 2086-2096.

② Näätänen R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin* 125 (6): 826-859.

③ Cheour, M., Shestakova, A., Alku, P., Čeponienė, R., & Näätänen, R. (2002). Mismatch negativity shows that 3-6-year-old children can learn to discriminate non-native speech sounds within two months. *Neuroscience Letters* 325 (3): 187-190.

④ Kraus, N., McGee, T., Carrell, T. D., King, C., Tremblay, K., & Nicol, T. (1995). Central auditory system plasticity associated with speech discrimination training. *Journal of Cognitive Neuroscience* 7 (1): 25-32.

300~550ms, 一般在儿童和青少年研究中出现^{①②}, 有可能反映了词汇水平的加工^③。与 MMN 相比, LDN 能够在对两三岁幼儿的研究中稳定发现, 能够反映幼儿对纯音的频率、时长、强度的辨别能力。因此, 研究者认为晚期 MMN 也许能够成为听觉学习和发展的早期指标^④。综上所述, 将 MMN 和晚期 MMN 两个成分结合, 能够帮助我们了解言语知觉在儿童时期的发展, 特别是儿童无法有效完成当前行为任务的时候。

一些研究集中于辅音感知的发展^{⑤⑥}。例如, Bishop 等 (2011) 测量了由 /ba/ 到 /da/ 变化引发的听觉 ERP, 该研究在 30 名儿童 (7~12 岁)、23 名青少年 (13~16 岁) 和 32 名成年人 (35~56 岁) 中进行。他们的研究结果显示, 在典型的 MMN 时间窗口 (100~250ms) 内, 失匹配反应的幅度随着年龄的增加而增加; 而在晚期时间窗口 (300~550ms) 内, 晚期辨别负波 (LDN) 的幅度随着年龄的增长而减小^⑦。Kraus 等人记录了 7~11 岁儿童和成人对标准音 /ga/ 和偏差音 /da/ 的 MMN 反应。结果表明, 儿童组和成人组之间的 MMN 峰值潜伏期和持续时间没有差异。出乎意料的是, 儿童组的 MMN 平均幅度大于成人组^⑧。McGee 等人报告说, 即使将特定声学特征调整到相对困难的水平 (即 /da/ 与 /ga/ 之间和 /wa/ 与 /ba/ 之间的 F3 起始频率和共振峰过渡), 学龄儿童在两组辅音对比 (/da/、/ga/ 和 /wa/、/ba/) 中仍然产生了显著的 MMN 反应^⑨。对于 6~7 岁儿童, Maurer、

① Čeponienė, R., Lepistö, T., Alku, P., Aro, H., & Näätänen, R. (2003). Event-related potential indices of auditory vowel processing in 3-year-old children. *Clinical Neurophysiology* 114 (4): 652-661.

② Čeponienė, R., Lepistö, T., Soininen, M., Aronen, E., Alku, P., & Näätänen, R. (2004). Event-related potentials associated with sound discrimination versus novelty detection in children. *Psychophysiology* 41 (1): 130-141.

③ Korpilahti, P., Krause, C. M., Holopainen, I., & Lang, A. H. (2001). Early and late mismatch negativity elicited by words and speech-like stimuli in children. *Brain and Language* 76 (3): 332-339.

④ Putkinen, V., Niinikuru, R., Lipsanen, J., Tervaniemi, M., & Huottilainen, M. (2012). Fast measurement of auditory event-related potential profiles in 2-3-year-olds. *Developmental Neuropsychology* 37 (1): 51-75.

⑤ Kraus, N., McGee, T., Micco, A., Sharma, A., Carrell, T., & Nicol, T. (1993). Mismatch negativity in school-age children to speech stimuli that are just perceptibly different. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 88 (2): 123-130.

⑥ Maurer, U., Bucher, K., Brem, S., & Brandeis, D. (2003). Altered responses to tone and phoneme mismatch in kindergartners at familial dyslexia risk. *NeuroReport* 14 (17): 2245-2250.

⑦ Bishop, D. V., Hardiman, M. J., & Barry, J. G. (2011). Is auditory discrimination mature by middle childhood? A study using time-frequency analysis of mismatch responses from 7 years to adulthood. *Dev Sci* 14 (2): 402-416.

⑧ Kraus, N., McGee, T., Carrell, T., Sharma, A., Micco, A., & Nicol, T. (1993). Speech-evoked cortical potentials in children. *Journal of the American Academy of Audiology* 4 (4): 238-248.

⑨ McGee, T., King, C., Tremblay, K., Nicol, T., Cunningham, J., & Kraus, N. (2001). Long-term habituation of the speech-elicited mismatch negativity. *Psychophysiology* 38 (4): 653-658.

Bucher、Brem 和 Brandei 在一个包含两个偏差音的范式中,使用了标准音/ba/和与标准音在声学上有大 (/ta/) 和小 (/da/) 差异的偏差音^①。低分辨率电磁断层成像 (LORETA) 的结果表明,儿童表现出一致的前额失匹配正波 (p-MMR) 和晚期负性反应,而成人则表现出前额中心的 MMN 和乳突正性反应。研究者认为,年龄适宜的前额正性失匹配反应反映了自动的检测,并且发展的轨迹必然包括这种大幅前额中心正性失匹配反应的减少,以便在成人中出现 MMN。

除了使用辅音—元音音节的研究,Čeponienė 等人的研究使用的是元音刺激,标准刺激是/a/,范畴间的一个偏差是/o/,范畴内的偏差是/ā/。结果发现,3岁儿童对范畴间刺激产生的 MMN 波幅比范畴内刺激大,这说明3岁儿童已经有了元音的范畴化知觉能力^②。与学龄儿童的 MMN 相比,3岁儿童元音 MMN 的潜伏期比学龄儿童更晚,说明3岁儿童辨别声音花费的时间更长^③。Shafer 等人考查了4~7岁儿童对英语元音/i/和/e/产生的 MMN。结果表明,较大年龄组(6~7岁)在100~400ms的时间窗产生了两个负成分,而较小年龄组(4~5岁)在100~250ms的时间窗内产生了一个大的正成分,然后跟着一个负成分^④。基于这个结果,研究者认为,元音辨别能力的成熟能够通过早期负成分的潜伏期及 p-MMR (失匹配正波) 是否出现反映出来。综上所述,众多研究采用的 MMN 发展指标各式各样,包括波幅、潜伏期、极性的正负等,这些不一致说明了 MMN 发展的时间进程是具有刺激特异性的,在不同的语言文化背景下,需要研究对本族语言最重要的语言特性才能对 MMN 的核心发展特征有所了解。

关于普通话儿童 MMN 反应的研究很少。Meng 等人测试了8~13岁阅读障碍和非阅读障碍儿童的 MMN 反应。语音刺激对比包括声母 (/da/和/ga/)、韵母 (/dan/和/dai/) 及词汇声调 (/ba1/和/ba2/)。该研究在对声母和元音的 MMN 反应中观察到了两组之间的差异,但在词汇声调条件下未观察到组间差异^⑤。然而,由于 Meng 等人的研究中缺乏正常发育组的原始波形和波幅,基于这些结果来描绘发展模式较为困难。Zhang 等人使用/pa2/~pa4/连续体研究了

① Maurer, U., Bucher, K., Brem, S., & Brandeis, D. (2003a). Altered responses to tone and phoneme mismatch in kindergartners at familial dyslexia risk. *NeuroReport* 14 (17): 2245-2250.

② Čeponienė, R., Lepistö, T., Alku, P., Aro, H., & Näätänen, R. (2003). Event-related potential indices of auditory vowel processing in 3-year-old children. *Clinical Neurophysiology* 114 (4): 652-661.

③ Čeponienė, R., Yaguchi, K., Shestakova, A., Alku, P., Suominen, K., & Näätänen, R. (2002). Sound complexity and “speechness” effects on pre-attentive auditory discrimination in children. *International Journal of Psychophysiology* 43 (3): 199-211.

④ Shafer, V. L., Yan, H. Y., & Datta, H. (2010). Maturation of speech discrimination in 4-to 7-year-old children as indexed by event-related potential mismatch responses. *Ear and Hearing* 31 (6): 735-745.

⑤ Meng X., Sai X., Wang C., Wang J., Sha S., et al. (2005). Auditory and speech processing and reading development in Chinese school children: Behavioural and ERP evidence. *Dyslexia* 11 (4): 292-310.

有无阅读障碍的学龄儿童对普通话词汇声调的范畴感知^①。结果表明,与范畴内偏差相比,年龄对照组对范畴间偏差表现出显著增强的 MMN 反应,而阅读障碍儿童未表现出这种效果。范畴间声调对比引发的增强 MMN 表明,普通话母语的 10 岁正常发育儿童已经形成了类似于成人的词汇声调语音表征。Lee 等人通过使用两偏差范式,测量了 4~6 岁学龄前儿童对普通话词汇声调、声母和元音的 MMN 反应,以研究年龄、语音显著性和偏差大小对 MMN 和 p-MMR 存在的影响^②。结果表明,对于普通话音节的必备成分(即词汇声调和元音),较大的偏差引发了类似成人的 MMN,而较小的偏差引发了 p-MMR。对于普通话音节的可选成分(即声调),学龄前儿童仅表现出 p-MMR。这些结果可能表明,从 p-MMR 到类似成人的 MMN 的过渡,为儿童语音感知是否变得成熟和自动化提供了信息。

有两项研究主要探讨了早期儿童期词汇声调感知能力的发展。Lee 等人(2012)发现,在 150~300ms 的时间窗口内,大的声调差异(T1 与 T3)在所有三组儿童(即 4 岁、5 岁和 6 岁)中引发了类似成人的 MMN,而小的声调差异(T2 与 T3)在 5 岁和 6 岁组中引发了 p-MMR,但在 4 岁组中未见反应。Liu 等人(2014)的报告显示,小的声调差异(T2 与 T3)仅在学龄前儿童(3~4 岁)和学龄儿童(7~8 岁)中引发了 LDN,并在晚期时间窗口内表现出负向反应。这种负性成分首次由 Korpilahti 等人在对儿童的研究中报告,并在相关研究中被称为晚期 MMN 或 LDN^③。这种负性成分出现在 MMN 之后,并在儿童和成人对语音刺激变化的反应中 400~430ms 时达到峰值^{④~⑥}。与 MMN 相比,LDN 在 2~3 岁的儿童中对基频、时长、强度和复合音源的变化表现出稳定的观察结果;

① Zhang Y., Zhang L., Shu H., Xi J., Wu H., et al. (2012b). Universality of categorical perception deficit in developmental dyslexia: An investigation of Mandarin Chinese tones. *J Child Psychol Psychiatry* 53: 874-882.

② Lee CY, Yen HL, Yeh PW, Lin WH, Cheng YY, et al. (2012). Mismatch responses to lexical tone, initial consonant, and vowel in Mandarin-speaking preschoolers. *Neuropsychologia* 50: 3228-3239.

③ Korpilahti, P., Lang, H. A., Aaltonen, O. (1995). Is there a late-latency mismatch negativity (MMN) component? *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 95: 96.

④ Čeponien, R., Lepistö, T., Alku, P., Aro, H., & Näätänen, R. (2003). Event-related potential indices of auditory vowel processing in 3-year-old children. *Clinical Neurophysiology* 114 (4): 652-661.

⑤ Čeponien, R., Lepistö, T., Soininen, M., Aronen, E., Alku, P., & Näätänen, R. (2004). Event-related potentials associated with sound discrimination versus novelty detection in children. *Psychophysiology* 41 (1): 130-141.

⑥ Kraus, N., McGee, T., Carrell, T., Sharma, A., Micco, A., & Nicol, T. (1993). Speech-evoked cortical potentials in children. *Journal of the American Academy of Audiology* 4 (4): 238-248.

LDN 具有以下特点: LDN 在儿童中占主导地位^{①~③}, 并随着年龄的增长而减少^{④⑤}。此外, LDN 在对较小偏差的反应中更为突出, 并且在有特定语言障碍 (SLI)^{⑥⑦}、阅读障碍^⑧和注意力缺陷/多动症^⑨的儿童中更为显著。LDN 被认为反映了对难以区分的声音的额外处理, 并可能与更高的认知功能相关, 如与注意力相关的处理或长期记忆。因此, 研究者建议 LDN 可以作为听觉学习和发展的早期指标^⑩。MMN 和 LDN 的汇合模式适合研究儿童期的语音感知发展, 特别是在无法轻易引发行为反应的情况下。

这些以往的研究有助于理解词汇声调的发展, 然而, 对于普通发展中的汉语儿童词汇声调发展的结论性结果仍不明确。这可能是因为在以往研究中使用的刺激对儿童来说过于困难, 因此难以观察到从儿童到成年人的词汇声调发展轨迹。此外, 研究中使用的技术可能未能充分地将信号与噪声分离开来。

为了在语音感知研究中区分声学信息与音位信息, 许多研究比较了音节与非音节的结果。音节是指属于母语的音节, 而非音节是指不符合母语音位规则的音

① Korpilahti, P., Lang, H., and Aaltonen, O. (1995). Is there a late-latency mismatch negativity (MMN) component. *Clinical. Neurophysiology* 95: 95-97.

② Cheour, M., Korpilahti, P., Martynova, O., & Lang, A. H. (2001). Mismatch negativity and late discriminative negativity in investigating speech perception and learning in children and infants. *Audiol. Neurootol* 6: 2-11.

③ Bishop, D. V. M., Hardiman, M. J., & Barry, J. G. (2011). Is auditory discrimination mature by middle childhood? A study using time-frequency analysis of mismatch responses from 7 years to adulthood. *Dev Sci* 14: 402-416.

④ Hommet, C., Vidal, J., Roux, S., Blanc, R., Barthez, M. A., De Becque, B., et al. (2009). Topography of syllable change-detection electrophysiological indices in children and adults with reading disabilities. *Neuropsychologia* 47: 761-770.

⑤ Liu, H. M., Chen, Y., and Tsao, F. M. (2014). Developmental changes in mismatch responses to mandarin consonants and lexical tones from early to middle childhood. *PLoS One* 9 (4): e95587.

⑥ Bishop, D. V., Hardiman, M. J., & Barry, J. G. (2010). Lower-frequency event-related desynchronization: a signature of late mismatch responses to sounds, which is reduced or absent in children with specific language impairment. *J Neurosci* 30: 15578-15584.

⑦ Kujala, T., and Leminen, M. (2017). Low-level neural auditory discrimination dysfunctions in specific language impairment-A review on mismatch negativity findings. *Dev Cogn Neurosci* 28: 65-75.

⑧ Neuhofff, N., Bruder, J., Bartling, J., Warnke, A., Remschmidt, H., Muller Myhsok, B., et al. (2012). Evidence for the late MMN as a neurophysiological endophenotype for dyslexia. *PLoS One* 7 (5): e34909.

⑨ Yang, M. T., Hsu, C. H., Yeh, P. W., Lee, W. T., Liang, J. S., Fu, W. M., et al. (2015). Attention deficits revealed by passive auditory change detection for pure tones and lexical tones in ADHD children. *Front Hum Neurosci* 9: 470.

⑩ Putkinen, V., Niinikuru, R., Lipsanen, J., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2012). Fast measurement of auditory event-related potential profiles in 2-3-year-olds. *Developmental Neuropsychology* 37 (1): 51-75.

节。音节与非音节的感知对比广泛用于研究婴儿语音感知的感知收窄现象^①。早期的语言接触非常重要，因为它可以影响语音感知^②。一项研究比较了美国婴儿和日本婴儿在区分两个英语音节时的表现，结果表明，语言经验促进了母语语音的感知表现^③。此外，Kuhl 等人（2003）还发现，曾经接触过一段时间普通话的美国婴儿在普通话语音感知方面表现优于其他婴儿。为了有效处理语音，普通话的语言经验还帮助建立了长期的词汇记忆痕迹。在长期词汇记忆的研究中，音节与非音节对常常作为对比刺激使用。Korpilahti 等人（2001）比较了对音节和非音节的 MMN 反应，这些音节或非音节包含相同的芬兰元音 /u:/ 和 /u/。结果显示，音节在儿童中引发了强烈的晚期 MMN，而非音节的 MMN 幅度显著小于音节。在声调语言中，词汇声调是区分词汇意义的重要单位，因此，一些研究人员也考察了在仅有词汇声调不同的音节与非音节之间的 ERP 反应差异。这些研究也发现，音节的波形比非音节的负向偏转更大，表明了声调语言音节的记忆痕迹被激活^{④⑤}。与非语音相比，语音的反应可能经历了不同的发展轨迹，因为儿童在母语语音上积累了相当多的经验。

关于言语刺激的难度，Hua 和 Dodd（2000）提出了一种语音显著性假说，以解释普通话语音习得的顺序，其中音节中成分的显著性由以下因素决定^⑥。首先是成分在音节结构中的地位，特别是它是必要的还是可选的（必要的成分比可选的更显著）。其次是成分区分音节词汇意义的能力；如果一个成分在区分词汇意义方面的能力更强，那么它的显著性就更高。最后是成分在音节结构中可选择数量；可选择的数量越多，显著性越低。语音显著性是语言特有的。某个语音特征的显著性由其在特定语言的语音系统中的作用决定，而不是由与其他语言的参考关系决定。对于普通话来说，声调的显著性最高，因为它是每个音节的必要成分，并且只有四种可能的选择：高平（T1）、高升（T2）、低降（T3）和高降

① Bosseler, A., Taulu, S., Pihko, E., Mäkelä, J., Imada, T., Ahonen, A., & Kuhl, P. (2013). Theta brain rhythms index perceptual narrowing in infant speech perception. *Frontiers in Psychology* 4: 690.

② Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., & Lindblom, B. (1992). Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science* 255 (5044): 606-608.

③ Kuhl, P. K., Stevens, E., Hayashi, A., Deguchi, T., Kiritani, S., and Iverson, P. (2006). Infants show a facilitation effect for native language phonetic perception between 6 and 12 months. *Dev Sci* 9 (2): F13-F21.

④ Gu, F., Li, J., Wang, X. D., Hou, Q. Q., Huang, Y., & Chen, L. (2012). Memory traces for tonal language words revealed by auditory event-related potentials. *Psychophysiology* 49 (10): 1353-1360.

⑤ Zhang, L. L., Zhong, Y. Q., Sun, J. W., Chen, L., Sun, J. Q., Hou, X. Y., ... Guo, X. T. (2020). Deficit of long-term memory traces for words in children with cochlear implants. *Clinical Neurophysiology* 131 (6): 1323-1331.

⑥ Hua, Z., and Dodd, B. (2000). The phonological acquisition of Putonghua (Modern Standard Chinese) *J Child Lang* 27: 3-42.

(T4)。改变词汇声调会改变词汇意义,例如, T1: yi1 “衣服”; T2: yi2 “阿姨”; T3: yi3 “椅子”; T4: yi4 “容易”。元音也是音节的必要成分。然而,由于其选项较多(普通话中有 22 个元音,包括单元音、双元音和三元音),其显著性低于词汇声调。起始辅音的显著性最低,因为其在音节结构中的存在是可选的,并且有 21 种可能的选择 (Lee et al., 2012)^①。对刺激难度的理解有助于为儿童言语知觉的脑电模式做铺垫。刺激难度的影响在成年人的研究中有所体现。关于成年人言语知觉 MMN 的研究发现,在汉语母语者中, T1 和 T3 对比引发的 MMN 比 T2/T3 对比引发的 MMN 更大^②。T2 的音高轮廓在声学上更接近 T3,而不是 T1。声调辨别和识别的研究数据证实, T2 和 T3 在声学上相似,比其他声调对更容易混淆。Luo 等人 (2006) 的报告显示,与辅音对相比,词汇声调对在右半球引发了更强的 MMN^③。Xi、Zhang、Shu、Zhang 和 Li (2010) 使用 MMN 范式研究了汉语母语者的词汇声调范畴感知,结果显示,范畴内偏差和范畴间偏差都引发了 MMN^④。与 Luo 等人 (2006) 的研究结果一致, F4 电极 (位于右额叶) 的 MMN 记录略大于 F3 电极 (位于左额叶) 的记录。然而,范畴效应仅在左额叶的 F3 电极处发现,其中范畴间偏差引发的 MMN 比范畴内偏差引发的 MMN 更大。Zhang 等人 (2012) 将这一组刺激应用于阅读障碍的儿童。他们发现,在年龄匹配的对照组中,范畴间偏差引发的 MMN 比范畴内偏差引发的 MMN 在左半球的 F3 电极中更大,而在阅读障碍儿童中则没有这种现象^⑤。值得研究的是,在普通话儿童中,何时对语音特征 (如词汇声调、元音和辅音) 的反应会表现出类似成人的 MMN 反应。

(三) 脑电数据分析技术的发展

经典的 ERP 分析方法主要关注的是在个别电极上随时间变化的波形。研究中先根据前人的研究和以往的经验选择感兴趣的电极,然后通过软件对该电极上的信号进行时域和频域上的分析。虽然这些经典的研究方法给我们提供了很多重

① Lee, C. Y., Yen, H. L., Yeh, P. W., Lin, W. H., Cheng, Y. Y., Tzeng, Y. L., et al. (2012). Mismatch responses to lexical tone, initial consonant, and vowel in Mandarin-speaking preschoolers. *Neuropsychologia* 50: 3228-3239.

② Chandrasekaran, B., Krishnan, A., and Gandour, J. T. (2007). Experience dependent neural plasticity is sensitive to shape of pitch contours. *NeuroReport* 18: 1963-1967.

③ Luo, H., Ni, J. T., Li, Z. H., Li, X. O., Zhang, D. R., Zeng, F. G., et al. (2006). Opposite patterns of hemisphere dominance for early auditory processing of lexical tones and consonants. *Proc Natl Acad Sci USA* 103: 19558-19563.

④ Xi, J., Zhang, L., Shu, H., Zhang, Y., & Li, P. (2010). Categorical perception of lexical tones in Chinese revealed by mismatch negativity. *Neuroscience* 170 (1): 223-231.

⑤ Zhang, L., Xi, J., Wu, H., Shu, H., & Li, P. (2012a). Electrophysiological evidence of categorical perception of Chinese lexical tones in attentive condition. *NeuroReport* 23 (1): 35-39.

要的结果，但是它们忽视了另一个多通道 EEG 信号所提供的重要信息维度：皮层上电场的空间特征及其随时间发生的变化。大脑任何活跃的神经元都会基于体素的传导在一个特定的时刻形成一种特定分布和极性的皮层电场^①。尽管不同的源有可能形成相同的皮层电场，但是反过来并不是这样：不同的皮层电场分布一定来自不同的源^②。因此，对电场地形图的分析——皮层上的电压等高线形状，寻找地形图差异能够帮助我们发现神经元在大脑中活动的不同瞬间有什么特点，可以在不同的时间阶段、实验条件或者不同被试组别之间进行对比。地形图分布分析还有另外一个重要优势：由于它描绘的是皮层各个电极的相对关系，因此地形图分布独立于所用参考的不同。也就是说，不论电场等高线的 0 值在哪里，各个电极的电压相对高度差别是一定的，模式是不变的。

Cartool 软件从开发距今已经有 14 年了，使用这个软件的研究者越来越多，到 2011 年，该软件的开发者 Denis Brunet 发表了一篇综述文章，对软件的使用方法进行了介绍。Cartool 软件的发展经历了一系列的发展历程：最初它只能动态展示 EEG 地形图分布的图像；然后逐渐可以实现电极替换以及过滤平均这些简单的处理；接着发展出了基于空间分布的数据驱动分段方法及匹配分析，可以输出若干地形图指标。目前已经可以进行两个条件的地形图统计检验。

在默认的状态下，Cartool 总是给我们展示两个重要指标 GFP (global field power) 和 GMD (global map dissimilarity)。GFP 的心理意义在于描述大脑的活跃程度，高 GFP 值对应的是此时大脑活动的信噪比高，也就是说大脑神经活动一致性程度高。每个时间点对应的地形图都有一个 GFP 值来衡量它。GMD 的心理意义在于描述两个脑地形图的差异性，当两个脑地形图完全一样时，GMD 的值最小为 0；当两个脑地形图分布完全相同但是极性完全相反时，GMD 的值最大为 2。GMD 的指标计算是脑地形图分析的第一步，当我们发现两个脑地形图的 GMD 值很大时，可以判定，两个条件或者两组人神经元的活动方式有所不同，即来自不同的源。当然，GMD 值也能随时间变化，代表随时间变化脑地形图的变化情况，用于评估在不同时间段，脑地形图的稳定性。一般来说，GFP 和 GMD 总是呈现负相关。也就是说，我们的大脑在剧烈活动时倾向于保持一定地形图分布，当 GFP 很小时，脑地形图分布发生着丰富的变化^③。

GMD 随时间的变化给我们提供了一个重要的信息，我们能够清楚地发现在某个时间采样点，脑地形图发生了突变，然后进入了一个稳定期；几十毫秒之

① Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG*. Oxford: Oxford University Press.

② Vaughan, H. G. (1982). The neural origins of human event-related potentials. *Annals of the New York Academy of Sciences* 388 (1): 125-138.

③ Lehmann, D., Ozaki, H., & Pal, I. (1987). EEG alpha map series: Brain micro-states by space-oriented adaptive segmentation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 67 (3): 271-288.

后,脑地形图分布又发生了突变,接下来又进入了一个稳定期。研究者给这些小段小段的稳定期起名为功能分段 (functional microstates),这一名称最初由 Lehmann 提出^①。这些功能分段所对应的就是一片段时间内大脑神经网络发生的一致性同步活动,这些小的功能分段所代表的就是大脑进行信息加工的基本单元,是由刺激所诱发的^②。对于 ERP 而言,连续的小的功能分段代表了大脑对信息进行了逐步的加工。Cartool 软件实现了通过聚类分析的方法对 ERP 进行数据驱动的分段分析^③。将数据进行分段分析之后,每一个人的数据都可以和组水平提供的脑地形图模版进行匹配分析,相似性的结果也是基于 GMD 指标。每个人每个采样点的脑地形图都会获得一个与其最像的脑地形图模版并计算它与模版的相似度。

Cartool 软件能够给我们提供丰富的脑地形图指标,本研究除经典的分析方法之外还会充分利用 Cartool 软件,对 ERP 的数据进行更深入的分析。

除了时域的分析,频域的分析也很重要。不同频带与不同的神经认知过程相关联。特别是有研究揭示了 θ 波频带 (4~8Hz) 对额颞区 MMN 生成的贡献,还发现 θ 波活动与几种认知功能有关,包括记忆编码、检索和维持。 β 波频带 (15~30Hz) 的活动被认为在知觉绑定和跨模态网络交互中起着重要作用。在语言研究中, β 波活动被发现与听觉/词汇记忆及 MMN 范式中的元音表征相关联,而 θ 波频带对语音对比的处理至关重要。关于词汇声调范畴化感知过程中语音对比对 θ/β 振荡的影响,以及在语音和非语音条件下两被试组在 θ 和 β 活动中的差异,目前还知之甚少^④。

(四) 学龄儿童 MMN 成分的分离技术

人类对听觉环境变化的无意识检测是一种重要的能力,具有进化起源,广泛应用于区分语音流中的差异。听觉变化检测的电生理指标是 MMN,一种脑电 ERP。

① Lehmann, D. (1971). Multichannel topography of human alpha EEG fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 31 (5): 439-449.

② Lehmann, D., Pascual-Marqui, R. D., & Michel, C. (2009). EEG microstates. *Scholarpedia* 4 (3): 7632.

③ Murray, M. M., De Lucia, M., Brunet, D., & Michel, C. M. (2009). Principles of topographic analyses for electrical neuroimaging. *Brain Signal Analysis*: 21-54.

④ Wang, X., Wang, S., Fan, Y., Huang, D., & Zhang, Y. (2017). Speech-specific categorical perception deficit in autism: An event-related potential study of lexical tone processing in Mandarin-speaking children. *Scientific Reports*, 7 (1): 43254.

生成 MMN 的过程被认为具有生物学意义, 通常会对环境变化进行无意识注意转移^{①~③}。这一变化检测过程在婴儿期就已显现^{④~⑨}, 这也是其在研究言语发展及临床人群中听觉/言语感知缺陷时广泛应用的一部分原因^⑩。在儿童时期, ERP 通常会在波形形态上发生显著变化, N1-P2 复合波的出现及 P1-N250 复合波随年龄发展减弱^⑪。这些强制性反应的变化与儿童 MMN 出现的时间窗口重合^{⑫~⑭}。因此, 研究如何将与这些成分相关的方差在儿童中分离开来显得尤为重要。

MMN 由偶发的偏差刺激自动诱发, 并且是无意识的, 它会在恒定的刺激序列中对多种听觉特征的变化做出反应, 如频率、时长和强度^{⑮⑯}。在成人中, MMN

① Csépe, V. (1995). On the origin and development of the mismatch negativity. *Ear and Hearing* 16 (1): 91-104.

② Schröger, E. (1997). On the detection of auditory deviations: a pre-attentive activation model. *Psychophysiology* 34 (3): 245-257.

③ Näätänen, R., Astikainen, P., Ruusuvirta, T., & Huotilainen, M. (2010). Automatic auditory intelligence: An expression of the sensory-cognitive core of cognitive processes. *Brain Research Reviews* 64 (1): 123-136.

④ Leppänen, P. H. T., Eklund, K. M., & Lyytinen, H. (1997). Event-related brain potentials to change in rapidly presented acoustic stimuli in newborns. *Developmental Neuropsychology* 13 (2): 175-204.

⑤ Cheour, M., Alho, K., Čeponienė, R., Reinikainen, K., Sainio, K., Pohjavuori, M., et al. (1998a). Maturation of mismatch negativity in infants. *International Journal of Psychophysiology* 29 (2): 217-226.

⑥ Cheour, M., Čeponienė, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., et al. (1998b). Development of language specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience* 1 (5): 351-353.

⑦ Leppänen, P. H. T., Pihko, E., Eklund, K. M., & Lyytinen, H. (1999). Cortical responses of infants with and without a genetic risk for dyslexia: II. Group effects. *NeuroReport* 10 (5): 969-973.

⑧ Cheour, M., Leppänen, P. H. T., & Kraus, N. (2000). Mismatch negativity (MMN) as a tool for investigating auditory discrimination and sensory memory in infants and children. *Clinical Neurophysiology* 111 (1): 4-16.

⑨ Leppänen, P. H. T., Guttorm, T. K., Pihko, E., Takkinen, S., Eklund, K. M., & Lyytinen, H. (2004). Maturation effects on newborn ERPs measured in the mismatch negativity paradigm. *Experimental Neurology* 190 (1): 91-101.

⑩ Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology* 118 (12): 2544-2590.

⑪ Ponton, C., Eggermont, J. J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: Evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology* 111 (2): 220-236.

⑫ Gomot, M., Giard, M. H., Roux, S., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2000). Maturation of frontal and temporal components of mismatch negativity (MMN) in children. *NeuroReport* 11 (14): 3109-3112.

⑬ Shafer, V. L., Morr, M. L., Kreuzer, J. A., & Kurtzberg, D. (2000). Maturation of mismatch negativity in school-age children. *Ear and Hearing* 21 (3): 242-251.

⑭ Shafer, V. L., Yan, H. Y., & Datta, H. (2010). Maturation of speech discrimination in 4-to 7-yr-old children as indexed by event-related potential mismatch responses. *Ear and Hearing* 31 (6): 735-745.

⑮ Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mantysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked-potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)* 42 (4): 313-329.

⑯ Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology* 118 (12): 2544-2590.

在偏差出现后 100~200ms 时达到峰值, 表现为前中部的负电位分布, 并在 Sylvian 下方的电极位置出现极性反转, 转为正电位^①。MMN 由至少两个来源组成, 分别为颞部和额部。颞部来源生成于双侧听觉皮层的颞平面, 与听觉特征的感觉记忆处理相关^②, 而额部来源通常表现为右半球的优势, 涉及自动注意力转移或“对比增强”机制, 用于增强对刺激的加工 (关于综述, 见 Deouell, 2007)^{③④}。

MMN 通常在 Oddball 范式中生成, 偶发的偏差刺激嵌入在频繁出现的标准刺激中^{⑤⑥}。一种观点认为, 当来自偏差刺激的感觉输入与由重复标准刺激所形成的记忆痕迹不匹配时, MMN 会被诱发。另一种观点则认为, 偏差刺激诱发 MMN 并非基于记忆的变化检测过程, 而只是激活新的传入神经元群体, 导致其对偏差刺激和标准刺激的反应之间存在差异, 从而实现变化的检测^{⑦~⑨}。尽管基于记忆痕迹的解释有大量证据支持, 但标准刺激和偏差刺激之间的较大差异也能在强制反应 (如 N1) 中产生差异, 这常常与 MMN 重叠^⑩。

在儿童成长过程中, 听觉强制性复合波 (P1-N1-P2-N2) 在形态、潜伏期和

① Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

② Giard, M. H., Perrin, F., Pernier, J., & Bouchet, P. (1990). Brain generators implicated in processing of auditory stimulus deviance: a topographic event-related potential study. *Psychophysiology* 27 (6): 627-640.

③ Gomot, M., Giard, M. H., Roux, S., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2000). Maturation of frontal and temporal components of mismatch negativity (MMN) in children. *NeuroReport* 11 (14): 3109-3112.

④ Opitz, B., Rinne, T., Mecklinger, A., von Cramon, D. Y., & Schröger, E. (2002). Differential contribution of frontal and temporal cortices to auditory change detection: fMRI and ERP results. *NeuroImage* 15 (1): 165-174.

⑤ Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., & Huottilainen, M., et al. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by magnetic brain responses. *Nature* 385 (6615): 432-434.

⑥ Näätänen, R., Jacobsen, T., & Winkler, I. (2005). Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the evidence. *Psychophysiology* 42 (1): 25-32.

⑦ Paavilainen, P., Alho, K., Reinikainen, K., Sams, M., & Näätänen, R. (1991). Right-hemisphere dominance of different mismatch negativities. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 78 (6): 466-479.

⑧ Jääskeläinen, I. P., Ahveninen, J., Bonmassar, G., Dale, A. M., Ilmoniemi, R. J., Levänen, S., ... Belliveau, J. W. (2004). Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 101 (17): 6809-6814.

⑨ May, P. J. C., & Tiitinen, H. (2010). Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained. *Psychophysiology* 47 (1): 66-122.

⑩ Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound—a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology* 24 (4): 375-425.

波幅上经历了变化^{①②}。通常,随着儿童的发展,ERP成分的潜伏期会缩短,这被认为与髓鞘化的增加及随着年龄增长的突触密度变化有关^③。从婴儿期到学龄前,听觉ERP主要由P1-N2复合波主导,而在约9岁时,成人的N1-P2复合波开始在快速刺激频率(<1秒)下出现,并在成年期占主导地位^{④⑤}。在成人中既可以观察到P1-N2复合波,也可以观察到N1-P2复合波^⑥。与其他ERP成分不同,若干研究表明,MMN在人的整个生命周期中相对稳定,并且在学龄期就与成人反应高度相似^{⑦~⑩}。

由于儿童的听觉脑反应具有相对较长的潜伏期范围和较长的持续时间,MMN通常与较早的强制性ERP成分重叠。尤其是N1,特别是其前额和颞上子

① Cunningham, J., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2000). Speech-evoked neurophysiologic responses in children with learning problems: Development and behavioral correlates of perception. *Ear and Hearing* 21 (6): 554-568.

② Ponton, C., Eggermont, J. J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: Evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology* 111 (2): 220-236.

③ Moore, J. K., & Guan, Y. L. (2001). Cytoarchitectural and axonal maturation in human auditory cortex. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 2 (4): 297-311.

④ Kushnerenko, E., Čeponienė, R., Balan, P., Fellman, V., Näätänen, R. (2002). Maturation of the auditory change detection response in infants: A longitudinal ERP study. *NeuroReport* 13: 1843-1848.

⑤ Ruhnau, P., Herrmann, B., Maess, B., & Schröger, E. (2011). Maturation of obligatory auditory responses and their neural sources: Evidence from EEG and MEG. *NeuroImage* 58 (2): 630-639.

⑥ Čeponienė, R., Yaguchi, K., Shestakova, A., Alku, P., Suominen, K., & Näätänen, R. (2002). Sound complexity and 'speechness' effects on pre-attentive auditory discrimination in children. *International Journal of Psychophysiology* 43 (3): 199-211.

⑦ Čeponienė, R., Cheour, M., & Näätänen, R. (1998). Interstimulus interval and auditory event-related potentials in children: Evidence for multiple generators. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 108 (4): 345-354.

⑧ Cheour, M., Leppänen, P. H. T., & Kraus, N. (2000). Mismatch negativity (mmn) as a tool for investigating auditory discrimination and sensory memory in infants and children. *Clinical Neurophysiology* 111 (1): 4-16.

⑨ Cheour, M., Korpilahti, P., Martynova, O., & Lang, A. H. (2001). Mismatch negativity and late discriminative negativity in investigating speech perception and learning in children and infants. *Audiol Neurotol* 6: 2-11.

⑩ Hämäläinen, J. A., Leppänen, P. H. T., Guttorm, T. K., & Lyytinen, H. (2008). Event-related potentials to pitch and rise time change in children with reading disabilities and typically reading children. *Clinical Neurophysiology* 119 (1): 100-115.

⑪ Hämäläinen, J. A., Ortiz-Mantilla, S., & Benasich, A. A. (2011). Source localization of event-related potentials to pitch change mapped onto age-appropriate MRIs at 6 months of age. *NeuroImage* 54 (3): 1910-1918.

成分^{①②}；以及 N2（在儿童中常被称为 N250）在前中部分布^③，并在双侧颞上听觉皮层有源（Bruneau 和 Gomot, 1998）。N1 和 N2 在时间和空间上都难以与 MMN 反应分离，因为它们起源于相似的脑区，并且在时间上重叠。在过去几十年中，成人中 MMN-N1 重叠已经得到了广泛研究^{④~⑩}，但在儿童中关于这种重叠的研究仍然需要更多信息。由于重叠的存在，以及标准刺激和偏差刺激反应之间的差异也可能由其他因素引起，如物理刺激差异和与呈现概率相关的神经元反应差异^⑪，因此在强制性反应中识别真正的失匹配负波成为一个挑战。

关于儿童 MMN 研究的文献很多^⑫，但很少有发展研究采用有效的控制条件

① Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound—a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology* 24 (4): 375-425.

② Bruneau, N., & Gomot, M. (1998). Auditory evoked potentials (N1 wave) as indices of cortical development. In: Garreau, B., (Ed). *Neuroimaging in child neuropsychiatric disorders*. Berlin: Springer.

③ Čeponiene, R., Alku, P., Westerfield, M., Torki, M., & Townsend, J. (2005). ERPs differentiate syllable and nonphonetic sound processing in children and adults. *Psychophysiology* 42 (4): 391-406.

④ Schröger, E., & Wolff, C. (1996). Mismatch response of the human brain to changes in sound location. *NeuroReport* 7 (18): 3005-3008.

⑤ Jacobsen, T., & Schröger, E. (2001). Is there pre-attentive memory-based comparison of pitch? *Psychophysiology* 38 (4): 723-727.

⑥ Jacobsen, T., Schröger, E., Horenkamp, T., & Winkler, I. (2003). Mismatch negativity to pitch change: Varied stimulus proportions in controlling effects of neural refractoriness on human auditory event-related brain potentials. *Neuroscience Letters* 344 (2): 79-82.

⑦ Jacobsen, T., & Schröger, E. (2003). Measuring duration mismatch negativity. *Clinical Neuropsychology* 114 (6): 1133-1143.

⑧ Campbell, T., Winkler, I., & Kujala, T. (2007). N1 and the mismatch negativity are spatiotemporally distinct ERP components: Disruption of immediate memory by auditory distraction can be related to N1. *Psychophysiology* 44 (4): 530-540.

⑨ Schröger, E. (2007). Mismatch negativity: A microphone into auditory memory. *Journal of Psychophysiology* 21 (3-4): 138-146.

⑩ Horváth, J., Czigler, I., Jacobsen, T., Maess, B., Schröger, E., & Winkler, I. (2008). MMN or no MMN: No magnitude of deviance effect on the MMN amplitude. *Psychophysiology*, 45 (1): 60-69.

⑪ Ponton, C., Eggermont, J. J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: Evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology* 111 (2): 220-236.

⑫ Bishop, D. V., Hardiman, M. J., & Barry, J. G. (2011). Is auditory discrimination mature by middle childhood? A study using time-frequency analysis of mismatch responses from 7 years to adulthood. *Dev Sci* 14 (2): 402-416.

来研究 MMN。尽管在成人中已经有几项类似的研究存在于听觉通道^{①~⑧}和视觉^{⑨~⑪}，但很少有研究关注言语刺激，尤其在儿童中的研究更少。唯一的儿童研究使用对照条件，研究了 N1 的发育，而非 MMN^⑫。他们的结论是，N1 在 9~10 岁的儿童中已经成熟，因此，由于 ERP 形态和时间上的差异，需要更多 MMN 的发展研究。

Lohvansuu 等人研究的目的是检测学龄儿童在对言语和相应非言语刺激的反应中，混杂在强制性 ERP 成分中的失匹配负波^⑬。为了更好地将 MMN 成分与其他同时出现的成分分离，应用了 CSD 变换^⑭和时间 PCA。CSD 变换清晰地揭示

① Jacobsen, T., & Schröger, E. (2001). Is there pre-attentive memory-based comparison of pitch? *Psychophysiology* 38 (4): 723-727.

② Jacobsen, T., & Schröger, E. (2003). Measuring duration mismatch negativity. *Clinical Neuropsychology* 114 (6): 1133-1143.

③ Opitz, B., Schröger, E., & von Cramon, D. Y. (2005). Sensory and cognitive mechanisms for preattentive change detection in auditory cortex. *European Journal of Neuroscience* 21 (2): 531-535.

④ Maess, B., Jacobsen, T., Schröger, E., & Friederici, A. D. (2007). Localizing pre-attentive auditory memory-based comparison: Magnetic mismatch negativity to pitch change. *NeuroImage* 37 (2): 561-571.

⑤ Cheng, C.-H., Hsu, W.-Y., Shih, Y.-H., Lin, H.-C., Liao, K.-K., Wu, Z.-A., & Lin, Y.-Y. (2010). Differential cerebral reactivity to shortest and longer tones: Neuromagnetic and behavioral evidence. *Hearing Research* 268 (1-2): 260-270.

⑥ Hsu, W.-Y., Cheng, C.-H., Lin, H.-C., Liao, K.-K., Wu, Z.-A., Ho, L.-T., & Lin, Y.-Y. (2010). Memory-based mismatch response to changes in duration of auditory stimuli: An MEG study. *Clinical Neurophysiology* 121 (10): 1744-1750.

⑦ Grimm, S., Escera, C., Slabu, L., & Costa-Faidella, J. (2011). Electrophysiological evidence for the hierarchical organization of auditory change detection in the human brain. *Psychophysiology* 48 (3): 377-384.

⑧ Ruhnau, P., Herrmann, B., & Schröger, E. (2012). Finding the right control: The mismatch negativity under investigation. *Clinical Neurophysiology* 123 (3): 507-512.

⑨ Pazo-Alvarez, P., Amenedo, E., & Cadaveira, F. (2004). Automatic detection of motion direction changes in the human brain. *European Journal of Neuroscience* 19 (7): 1978-1986.

⑩ Astikainen, P., Lillstrang, E., & Ruusuvirta, T. (2008). Visual mismatch negativity for changes in orientation-A sensory memory-dependent response. *European Journal of Neuroscience* 28 (11): 2319-2324.

⑪ Kimura, M., Katayama, J., Ohira, H., & Schröger, E. (2009). Visual mismatch negativity: New evidence from the equiprobable paradigm. *Psychophysiology* 46 (2): 402-409.

⑫ Ruhnau, P., Herrmann, B., Maess, B., & Schröger, E. (2011). Maturation of obligatory auditory responses and their neural sources: Evidence from EEG and MEG. *NeuroImage* 58 (2): 630-639.

⑬ Lohvansuu, K., Hämäläinen, J. A., Tanskanen, A., Bartling, J., Bruder, J., Honbolygó, F., ... & Leppänen, P. H. T. (2013). Separating mismatch negativity (MMN) response from auditory obligatory brain responses in school-aged children. *Psychophysiology* 50 (7): 640-652.

⑭ Perin, F., Pernier, J., Bertrand, O., & Echallier, J. F. (1989). Spherical splines for scalp potential and current density mapping. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 72 (2): 184-187.

了潜在皮层活动的图像,而 PCA 则被证明是一种有效的方法,能够找到感兴趣的时间点,先前在其他儿童 ERP 研究中也已成功使用^{①②}。CSD-PCA 方法被认为可以将头皮电位与解剖学相关的电流源之间建立联系。五个主成分(PCS)反映了典型 MMN 时间窗口 100~200ms 内的区分处理及强制性反应。

尽管 PCA 程序本身并未突出任何特定的 MMN 成分,但它有效地分离了 MMN 时间窗口内的几个潜伏期范围,可能反映了听觉处理的不同阶段。将 PCA 因子得分与 EQ 条件相结合有助于确定这些阶段中哪些反映属于变化检测处理,而不是强制性或外源性反应。

在对非言语刺激的反应中,变化检测加工出现在 112ms、136ms 和 160ms 的主成分中,既出现在前中部区域,也出现在 Sylvian 下方的从底侧到背侧颞叶皮层区域。言语刺激在前中央主成分中产生了在 136ms、160ms、184ms 和 204 ms 处检测到的 MMN,但在 Sylvian 下方的主成分中仅在 160ms 处检测到 MMN。这些 MMN 对非言语和言语刺激的潜伏期差异不能归因于非言语和言语刺激的上升时间差异,因为从刺激开始到声音达到最大强度的时间差异在言语刺激和其非言语等效物之间仅为 2~3ms。更为可能的是,潜伏期差异是由于刺激的复杂性;言语刺激包含比非言语刺激更多的频带,此外,还嵌入了声门脉冲^{③④}。此外,由于长期存在的母语元音 /y/ 和 /i/ 的表征,言语刺激的自上而下处理可能在言语和非言语刺激之间的 MMN 差异中发挥作用。使用芬兰元音的研究中,Jaramillo 等人(2001)观察到,成年人对言语刺激的处理效率高于和谐音调,导致增强的 MMN^⑤,他们认为这是由于母语言语声音比不熟悉的声音更容易和更迅速地激活长期记忆痕迹。

在 Sylvian 下方观察到的反应被认为主要反映了 MMN 的颞叶源,而前中央

① Härmäläinen, J. A., Leppänen, P. H. T., Guttorm, T. K., & Lyytinen, H. (2007). N1 and P2 components of auditory event-related potentials in children with and without reading disabilities. *Clinical Neurophysiology* 118: 2263-2275.

② Järvinen-Pasley, A., Ahonen, T., Takio, M., Lyytinen, H., Kraus, N. (2008). Event-related potentials to pitch and rise time change in children with reading disabilities and typically reading children. *Clinical Neurophysiology*, 119 (1): 100-115.

③ Bruder, J., Leppänen, P. H. T., Bartling, J., Csépe, V., Démonet, J-F., & Schulte-Körne, G. (2011a). Children with dyslexia reveal abnormal native language representations: Evidence from a study of mismatch negativity. *Psychophysiology* 48: 1107-1118.

④ Bruder, J., Leppänen, P. H. T., Bartling, J., Csépe, V., Démonet, J-F., & Schulte-Körne, G. (2011b). An investigation of prototypical and atypical within-category vowels and non-speech analogues on cortical auditory evoked related potentials (AERPs) in 9 year old children. *International Journal of Psychophysiology* 79: 106-117.

⑤ Jaramillo, M., Ilvonen, T., Kujala, T., Alku, P., Tervaniemi, M., & Alho, K. (2001). Are different kinds of acoustic features processed differently for speech and non-speech sounds? *Cognitive Brain Research* 12 (3): 459-466.

活动被认为是颞叶源和 MMN 的额叶源的总和^{①~④}。观察偏差/y/和标准/i/（偏差—标准）之间的反应差异时，可以看到在 112ms 时已经在颞叶区出现了区分性反应。随后在前中央区检测到的区分性成分部分重叠，主成分在 136ms、160ms、184ms 和 204ms 处达到峰值。这在偏差/y/—控制/y/对比在前中央区的情况时也是如此。然而，对于偏差—控制对比，MMN 在 Sylvian 下方的颞叶区，在主成分中直到 160ms 才出现。因此，当观察 Sylvian 下方的区域时，在 112ms 和 136ms 的主成分中对言语刺激的标准/i/和偏差/y/的反应差异不能解释为“真正的”MMN，而是具有强制性的性质，很可能代表 N1 的颞叶源。这与 Ruhnau 等人（2011）的研究一致，其在 9~10 岁时使用 500ms 的 SOA 观察到了 N1 波^⑤。

对于非言语刺激，颞叶和额叶的变化检测激活似乎是同步的，两者在 100ms 后出现并在刺激开始后约 170ms 消退。因此，可以合理推测，仅在 180~200ms 的言语刺激观察到的额叶变化检测激活可能是特定言语的，可能代表了元音的进一步区分处理或部分重叠的注意力转移^⑥。主成分在 136ms 处可能显示了对言语刺激 MMN 处理的开始，反映了声学特征变化检测处理的更一般变化，其最大振幅约在 160ms 处达到。接下来的 184ms 和 204ms 的成分似乎代表了对言语更复杂特征的前中央变化检测过程^⑦。

MMN 反应的潜伏期与先前儿童研究一致。大约在 10 岁时，MMN 在 137~198ms 处出现（元音的潜伏期晚于其非言语对应物），而 N1 在 98~114ms 处观

① Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)* 42 (4): 313-329.

② Baldeweg, T., Williams, J. D., & Gruzelier, J. H. (1999). Differential changes in frontal and sub-temporal components of mismatch negativity. *International Journal of Psychophysiology* 33 (2): 143-148.

③ Rinne, T., Alho, K., Ilmoniemi, R. J., Virtanen, J., & Näätänen, R. (2000). Separate time behaviors of the temporal and frontal mismatch negativity sources. *NeuroImage* 12 (1): 14-19.

④ Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology* 118 (12): 2544-2590.

⑤ Ruhnau, P., Herrmann, B., Maess, B., & Schröger, E. (2011). Maturation of obligatory auditory responses and their neural sources: Evidence from EEG and MEG. *NeuroImage* 58 (2): 630-639.

⑥ Deouell, L. Y. (2007). The frontal generator of the mismatch negativity revisited. *Journal of Psychophysiology* 21 (3): 188-203.

⑦ Jaramillo, M., Ilvonen, T., Kujala, T., Alku, P., Tervaniemi, M., & Alho, K. (2001). Are different kinds of acoustic features processed differently for speech and non-speech sounds? *Cognitive Brain Research* 12 (3): 459-466.

察到^{①~③}。非言语在 112ms 时出现 MMN, 言语在 160ms 时出现 MMN。此前在没有控制条件的情况下, 研究还表明, 儿童的 MMN 在音节上的潜伏期比纯音长, 但在元音上没有差异^④。

从脑地形图上来看, 作为控制条件的等概率 (EQ) 条件下的脑地形图与非言语偏差刺激的因子得分的脑地形图, 其分布在空间上是相似的, 但负的程度在 EQ 条件下显著减弱。在两个条件中, 前中央负性主要在右半球被观察到。相比之下, 在言语刺激时, 在右半球可以观察到清晰的双极结构, 表现为中央负性和颞叶正性, 这在偏差刺激及其 EQ 条件中相似。在 136ms 时, 其对非言语刺激的负性反应变为双侧性和更靠近前部。测试目标对偏差和标准刺激以及对偏差刺激和其 EQ 控制的反应分布明显不同, 清楚地表明 MMN 与强制性 ERP 是可分离的。在 Oddball 和 EQ 条件下, 偏差/y/刺激的反应比非言语刺激的反应弱, 尤其是与非言语偏差反应相比。在这个潜伏期, 对言语偏差刺激的反应分布比对左半球更前部和更强。尽管振幅较低, 但偏差和标准刺激及偏差和其控制刺激之间的反应差异表明, 言语刺激出现了 MMN 反应。在 160ms 时, 对非言语和言语刺激的反应分布暴露出明显的双侧 MMN 成分。对非言语刺激的颞区正性反应更强, 而负性反应在对言语刺激的反应中更靠前部。非言语偏差刺激在言语偏差刺激的反应更前部的分布可能是由于变化检测过程的阶段: 对于非言语刺激, MMN 在 160ms 后消退; 而对于言语刺激, MMN 刚刚出现并在接下来的 50ms 内继续, 这可能表明言语刺激语音特征的进一步加工。在非言语条件下, 184ms 和 204ms 处的主成分显示, 标准刺激的激活超过了偏差刺激, 表明 MMN 的结束。与非言语反应结束时类似, 对言语刺激的 MMN 反应前移 (从中央到前部), 204ms 的最后一个主成分处于最前部。

对于言语和非言语刺激, 颞叶记录点的半球效应在 112ms 和 136ms 处的主成分中发现, 右侧占优势; 而在 184ms 时, 言语刺激表现出左侧优势, 非言语刺激在 184ms 和 204ms 的主成分中表现出左侧优势。在前中央区, 右半球优势在 204ms 的主成分中出现, 适用于两种刺激类型, 但在 112ms 的最早主成分中

① Gomot, M., Giard, M. H., Roux, S., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2000). Maturation of frontal and temporal components of mismatch negativity (MMN) in children. *NeuroReport* 11 (14): 3109-3112.

② Ponton, C., Eggermont, J. J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: Evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology* 111 (2): 220-236.

③ Lepistö, T., Silokallio, S., Nieminen-von Wendt, T., Alku, P., Näätänen, R., & Kujala, T. (2006). Auditory perception and attention as reflected by the brain event-related potentials in children with Asperger syndrome. *Clinical Neurophysiology* 117 (10): 2161-2171.

④ Csépe, V. (1995). On the Origin and Development of the Mismatch Negativity. *Ear and Hearing* 16 (1): 91-104.

仅适用于非言语刺激。右半球优势与 Korpilahti 和 Lang (1994) 在学龄健康对照儿童中的早期研究及成人中的许多研究一致^{①~④}。Korpilahti 和 Lang (1994) 发现,特别是对于频率刺激,MMN 偏侧化到右半球,而不是时长刺激。然而,通常报告言语刺激的特征(除韵律外)在左半球处理得更多^⑤。言语刺激的半球效应可能与刺激的短暂性和合成性质有关,也可能是因为它们只能基于频率线索进行区分^⑥。然而,应该注意的是,在 EEG 中,电场在通过头部组织传播时会扩散,很难在没有源定位分析的情况下准确估计负责 ERP 的脑区,即使在半球水平上也是如此^⑦。

今后的研究可以关注 ERP 反应的源定位,这对于深入理解 MMN 相关的变化检测过程的大脑激活来源非常重要。尽管通过 CSD 转换处理后的 ERP 数据已经通过消除体积传导贡献,提供了比使用场电位更好的原始源估计^⑧,但源定位可以进一步提高解剖特异性,并区分 MMN 源的时间进程。

总之,通过在经典的偏差—标准对比之上实施额外的偏差—控制对比,可以将 MMN 与强制性听觉脑反应分离开来。加入额外对比并未影响在前额中部电极位置测得的 MMN 潜伏期。相反,在 Sylvian 下方的记录点观察到了 MMN 潜伏期的差异。若未应用额外的偏差—对照对比,观察到的语音刺激反应的差异出现得比使用偏差—对照对比时要早得多。早期颞叶激活具有强制性性质,当根据额外的偏差—控制对比判断时,非言语刺激的 MMN 比言语刺激的 MMN 更早出现。因此,建议使用 EQ 条件将基于记忆痕迹的变化检测处理与强制性传入反应分离开来。

① Näätänen, R., Paavilainen, P., & Reinikainen, K. (1989). Do event-related potentials to infrequent decrements in duration of auditory stimuli demonstrate a memory trace in man. *Neuroscience Letters* 107 (1-3): 347-352.

② Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

③ Paavilainen, P., Alho, K., Reinikainen, K., Sams, M., & Näätänen, R. (1991). Right-hemisphere dominance of different mismatch negativities. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 78 (6): 466-479.

④ Opitz, B., Mecklinger, A., von Cramon, D. Y., & Kruggel, F. (1999). Combining electrophysiological and hemodynamic measures of the auditory oddball. *Psychophysiology* 36 (1): 142-147.

⑤ Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage* 62 (2): 816-847.

⑥ Zatorre, R. J., & Belin, P. (2001). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex* 11 (10): 946-953.

⑦ Otten, L. J., & Rugg, M. D. (2005). Interpreting event-related brain potentials. In: Handy, T. C. (Ed.), *Event-related potentials: A methods handbook*. Cambridge, MA: MIT Press.

⑧ Kayser, J., & Tenke, C. E. (2006). Principal component analysis of Laplacian waveforms as a generic method for identifying ERP generator patterns; I. Evaluation with auditory oddball tasks. *Clinical Neurophysiology* 117 (2): 348-368.

三、声调范畴化知觉加工

(一) 声调在汉语中的重要角色

物理学领域关于声学的研究表明,任何声音都有四种基本属性:音质、音长、音强、音高。音素的不同是音质上的不同。例如,在敲锣打鼓或者交响乐演奏中,每一种乐器的声音听起来都不一样。它们的差别主要是音质上的。胡琴和小提琴的音质不一样,这是由琴箱大小和形状不同,以及琴弦引起的共鸣不同所造成的。同样,人类发音时,喉腔、咽腔、口腔(或鼻腔)组成了共鸣腔,这种共鸣腔的大小和形状复杂多变,可以产生不同音质的声音(元音和辅音)。

音段是指具有一定时间长度(音长)的语音单位,通常指元音或辅音,音段本质上就是音素。人类语言主要由元音、辅音组成语流。在许多拼音文字中,字母表示的是元音和辅音。对于这种读音系统来说,似乎字母就已经足够了。但是汉语是声调语言,汉语声调是语素音节的音高类型。声调能够起区分词义(语素义)的重要作用。各语种都有语调,语调是语句的音高类型。许多语种都有重音,重音的性质比较复杂,在各语种中并非都一样。声调、语调、重音等都被看成是音段系统上叠加的成分,被称为超音段信息。超音段信息就是言语声音里的音长、音强和音高等成分。虽然说超音段特征附着表现在音段特征上,但是其作用远非从属作用所能概括。

汉语是典型的声调语言,汉语母语者从开始接触语言起就接触声调。声调区别语义的功能很容易理解,“妈、麻、马、骂”是比较经典的例子。声调的别义功能还有一个有趣的现象,在语流中,当只有声母韵母而没有声调的情况下,汉语母语者仍然能够根据上下文判断语义,对声调进行恢复。声调除了别义功能,还有一个重要功能,即为方言变体创造了广阔的发展空间。中国很多地方的方言,其实声母、韵母差别不大,但其声调各有特色,这是各种方言的显著特征。音高和音长是声调的核心要素,音高表现为声调的调值,音长表现为声调的平仄。汉语因为声调的存在,诵读起来字正腔圆、铿锵有力。每种语言的母语研究者都倾向于选择在本民族语言中最重要的特征进行研究,因此,汉语声调的研究理应得到重视^①。

汉语是一种声调语言。声调在汉语中的作用与元音和辅音同样重要。与辅音快速变化的特征不同,声调是一种慢速变化的声音信息。有研究者认为,对慢速

^① Leppänen, P. H. T., Choudhury, N., Thomas, J., Jing, H. K., & Benasich, A. A. (2002). Brain event-related potentials index rapid auditory processing in adults and 24-month-old children. *Journal of Cognitive Neuroscience* 14 (5): 1-7.

变化特征的感知,同样是语音意识相关的非常重要的能力^{①~③}。除鼻音外,所有汉字音节都是由一个元音和一个辅音组成的 CV 音节,这种简单的组合造成了汉语中大量的同音字。在这样的情况下,声调的语义辨别作用显得尤为重要,声调使得汉语别具特色。前人对阅读障碍儿童的研究表明,汉语阅读障碍儿童的声调感知比正常儿童更差^④。Chan 和 Siegle 通过对粤语被试的研究发现,阅读成绩差的被试在声调辨别上的成绩更差。同样,Siok 和 Fletcher 通过对普通话被试的研究,发现声调意识和汉字识别有着显著的相关。早在 1975 年,Chan 等人就发现,汉语被试对声调感知加工是范畴性的。声调感知是如何发展变化的,从儿童到成年人经历了怎样的发展模式,究竟哪个年龄段的儿童的声调感知达到了成年人的水平,这些都是研究者非常关心的问题。

(二) 范畴化知觉的形成和发展

在丰富复杂的世界中,范畴化知觉是人类发展出的很重要的认知能力。如同人类辨别光谱中的颜色一样,人们能够从连续变化的声学信号中知觉出离散的音位信息。范畴化知觉是人类进行高效率的言语感知的重要前提,范畴化知觉能力成熟后,对于范畴间信息的辨别能力会明显好于对范畴内信息的辨别。那么,语音的范畴化知觉是如何发展起来的呢?声调语言母语者对于声调的知觉有什么特点呢?

研究表明,母语经验在个人的成长过程中塑造了语音的范畴化知觉。随着语音能力的正常发展,人们逐渐发展出了符合母语特点的语音范畴,对母语中的音位信息越来越敏感,而对非母语的语音范畴敏感性逐步下降。例如,Kirmse 等人 2008 年的研究表明,MMN 对母语中元音时长等属性的变化敏感,但是对其他语言不敏感。范畴化知觉能力在儿童期逐渐发展,直到形成稳固的范畴边界。正常成人在知觉到熟悉的语音属性时,就会把声波与头脑中抽象的音位表征对应起来,产生范畴化知觉;而知觉到不熟悉的、还没有建立起语音表征的声音属性时,这种知觉就不是范畴化的,其知觉按照声音的物理维度连续变化。被人们如

① Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences* 15 (1): 3-10.

② Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S., et al. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (16): 10911-10916.

③ Goswami, U., Wang, H. L. S., Cruz, A., Fosker, T., Mead, N., & Huss, M. (2011). Language-universal sensory deficits in developmental dyslexia: English, Spanish, and Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience* 23 (2): 325-337.

④ Zhang, L., Xi, J., Wu, H., Shu, H., & Li, P. (2012a). Electrophysiological evidence of categorical perception of Chinese lexical tones in attentive condition. *NeuroReport* 23 (1): 35-39.

此依赖的母语范畴化知觉能力在语言经验的作用下是如何发展出来的呢?在什么阶段达到了成熟的水平?许多研究者对这些问题做了大量的研究。语音知觉从出生就开始了,婴儿一出生就具备了一定的语音辨别能力,但是没有建立起语音范畴,对范畴内和范畴间的语音信息具有同样的分辨能力^①。Cheour 等人比较了6~12个月婴儿的母语音位表征神经机制的发展情况。他们发现,6个月大的芬兰婴儿对母语元音/ö/和爱沙尼亚元音/õ/的辨别都出现MMN;到了12个月,芬兰婴儿对母语元音的MMN显著增大了,但是对爱沙尼亚元音的MMN却显著减弱了^②。Nittroer 和 Miller 的研究发现,相对于4岁儿童来说,7岁儿童的语音范畴加工能力更接近成年人的语音知觉模式^③。Emil 和 Eeffting 检测了9~17岁青少年的语音知觉能力,结果发现,在9~17岁这一年龄阶段中,VOT的语音边界不断变化,而且17岁青年的范畴边界和成人的范畴边界依然不同^④。Hazan 和 Barrett 使用经典的识别任务,让84个6~12岁的儿童和13个成年人参加了实验,语音刺激为通过改变单独的一个语音特征或者联合的几个特征形成的6个语音连续体。结果发现,识别函数的斜率随年龄的增长而逐渐增大,但12岁的儿童的语音知觉仍然没有达到成年人的水平^⑤。Walley 和 Flege 的研究也得到了相似的结果。他们比较了母语为英语的5岁、9岁儿童和成人三组被试在采用两种语音刺激下的表现,分别为合成的母语和非母语的语音连续体。在母语连续体中,两端刺激为英语元音/I/到/i/;在非母语连续体中,两端刺激为英语元音/I/和非英语元音/Y/。他们发现,识别函数的斜率随年龄的增长而逐渐增加,尤其是对母语元音连续体,这种变化更为明显^⑥。

1. 范畴化知觉的研究范式

言语感知的前提要求人们能够将连续的声学信号知觉为离散的音位信息,即

① Cheour, M., Alho, K., Čeponienė, R., Reinikainen, K., Sainio, K., Pohjavuori, M., et al. (1998a). Maturation of mismatch negativity in infants. *International Journal of Psychophysiology* 29 (2), 217-226.

② Cheour, M., Čeponienė, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., et al. (1998b). Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience* 1 (5): 351-353.

③ Nittroer, S., & Miller, M. E. (1997b). Predicting developmental shifts in perceptual weighting schemes. *J Acoust Soc Am* 101 (4): 2253-2266.

④ Emil, J., & Eefftingb, W. (1986). Linguistic and developmental effects on the production and perception of stop consonants. *Phonetica* 43: 155-171.

⑤ Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics* 28 (4): 377-396.

⑥ Walley, A. C., & Flege, J. E. (1999). Effect of lexical status on children's and adults' perception of native and non-native vowels. *Journal of Phonetics* 27 (3): 307-332.

范畴化知觉^①。50多年来, 范畴化知觉的研究方法经历了从行为到脑机制的演化过程。范畴化知觉的研究材料都是通过人工方法合成从一个语音范畴变化到另一个语音范畴的语音连续体, 在这个连续体中抽取刺激呈现给被试。研究的范式包括 ABX 范式、分辨范式和识别范式。ABX 范式的记忆负荷较大, 被试需要听三个来自连续体的声音刺激, 判断第三个听觉刺激与前两个哪一个听起来比较像。分辨范式 (discrimination paradigm) 是从连续体中选择两个声音刺激组成一个刺激对, 然后呈现给被试, 要求被试判断听到的两个声音是否相同, 做按键反应。分辨范式也需要个体将第一个听觉刺激进行存储, 然后将第二个刺激进行匹配。相比之下, 识别范式要求被试立即对单一的刺激进行判断, 最大限度排除了工作记忆的影响作用。识别范式 (identification paradigm) 是给被试呈现一个声音, 让被试判断其听到的声音究竟属于哪个一个语音范畴, 并做按键反应。识别范式主要考察被试对典型语音刺激的识别率的高低, 以及是否出现了范畴间的识别突变。范畴化主要表现为对范畴间语音刺激的辨别率出现一个辨别高峰, 而对范畴内刺激的辨别率出现辨别低谷。在识别范式和分辨范式的基础上, 研究者提出考察某一声音特征是否具有范畴化特征, 主要考察三个方面的指标: 第一, 在识别任务中是否存在明显的范畴边界; 第二, 在辨别任务中是否存在相应的辨别高峰; 第三, 范畴边界和辨别高峰是否对应^②。随着技术的发展, ERP 广泛应用于言语范畴性知觉研究, 使得研究者可以深入了解言语知觉的内在神经机制。Oddball 实验范式作为一个经典的范畴化知觉研究范式得到了研究者的广泛关注, 前人通过大量的研究已经看到了阅读障碍者和正常人在辅音特征的范畴化知觉上有显著的差异。在汉语的文化背景下, 研究言语加工的底层机制可以从范畴化知觉入手, 利用 ERP, 通过追踪研究, 探讨儿童早期言语加工的底层机制对阅读能力的预测作用。

2. 范畴化知觉的相关研究

Liberman 在 1957 年的研究使用的是人工合成的 CV (辅音和元音) 音节制作成在第二共振峰上变化的语音连续体 (ba-da-ga)。这三个音节的声学特征在于第二共振峰过渡, 即辅音共振峰的起始频率不同, 但都在相同的时间内变化到相同的频率。结果发现, 被试对同一范畴内的语音刺激难以区分, 但是对范畴间刺激的差异非常敏感, 具体表现为在识别范式下出现明显的范畴边界, 出现识别百分比的突变; 而在辨别范式下对范畴间刺激的分辨率显著高于范畴内刺激的分辨率。

① Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology* 54 (5): 358-368.

② Repp, B. H., Healy, A. F., & Crowder, R. G. (1979). Categories and context in the perception of isolated steady-state vowels. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance* 5 (1): 129-145.

研究者又相继探讨了辅音的其他特征(VOT)及元音的范畴化知觉加工。研究发现,人们在VOT的知觉上也发现了类似的范畴化加工^①。相比之下,人们对元音的感知不是范畴的,虽然元音的识别曲线表现出一定的范畴化,但是人们对范畴内的元音有更好的区分,而且对元音的分辨主要是连续的而非范畴的。从发现范畴知觉至今,对范畴性知觉研究的重点一直围绕着辅音和元音不同音位信息,例如,对辅音的第二共振峰、VOT、duration等音段信息的研究,但是对超音段信息的研究相对还比较少,例如对声调这种超音段特征的范畴知觉研究还十分不足。

近年来也有一些研究者开始对汉语的语音范畴加工的发展感兴趣。席洁等人选取5~7岁儿童和成人,采用行为的范式,探讨了声调和辅音VOT特征的发展模式,发现这两个语音特征的发展模式不同,声调范畴化加工发展较早,6岁的儿童已经获得了和成人类似的知觉能力,但是VOT发展得相对晚一些,到7岁还没有达到成人的水平。刘文理等人也发现了儿童VOT识别曲线的斜率要比成人低,说明儿童辅音VOT特征的范畴化知觉能力还没有达到成年人水平^②。对声调和辅音发展轨迹的比较,目前还停留在行为测查阶段,行为研究容易受到较多因素的影响,为了清楚地了解声调和辅音的发展轨迹,还是需要利用脑水平上的研究技术来进行探索。

(三) 声调的范畴化知觉

声调不只存在于汉语中,许多其他国家的语言也具有声调特征,如泰语。在美洲和非洲的一些声调语言中,声调的功能与汉语有很大的不同,如不同的声调代表不同的人称、不同的时态、不同的语态及不同的格形式。声调超音段特征在声学属性上表现为基频(F0)的变化(AT, 1976)。根据高度(height)和曲线(contour)这两个属性,声调可以分为高低型和旋律型。高低型声调的基频几乎没有转折,主要差别在基频高度的变化;旋律型声调具有一定的转折变化。

1. 偏侧化

使用词汇声调来区分词汇语义是汉语及其他声调语言的一个特征。根据Yip(2002)的分类,世界上的语言可以根据音高信息在表达意义中的作用分为三类:声调语言(如汉语)、语调语言(如英语)和音高重音语言(如日语)^③。在声调

① Liberman, A., Harris, K. S., Eimas, P., Lisker, L., & Bastian, J. (1961). An effect of learning on speech-perception-the discrimination of durations of silence with and without phonemic significance. *Language and Speech* 4 (4): 175-195.

② Liu, W., Shu, H., & Yang, Y. (2009). Speech perception deficits by Chinese children with phonological dyslexia. *J Exp Child Psychol* 103 (3): 338-354.

③ Yip, M. (2002). *Tone*. Cambridge: Cambridge University Press.

语言中,不同的词汇语义可通过音节层面的音高高度和音高轮廓的变化来表达;而在语调语言中,音高变化仅发生在短语或句子层面。在音高重音语言中,音高变化发生在音节之间。近年来,研究者对与声调语言相关的神经认知过程产生了兴趣^{①②}。也有几项研究使用了包括 ERP 和功能磁共振成像(fMRI)在内的神经成像技术来研究汉语中的词汇声调加工^{③~⑥}。

当汉语母语者加工汉语的词汇声调时,他们至少需要加工两种信息:包括听觉输入的物理特征(如基频,F0)的声学信息和基于词汇语义来识别词汇类别的语音信息^{⑦⑧}。为了探究在词汇声调加工过程中声学信息与语音信息之间的差异,已有的研究思路是探究汉语的词汇声调加工在大脑中是左侧化还是右侧化。功能性假设认为,当声调作为语音单元处理时,它们侧重于左半球;而当它们作为纯粹的声学信息处理时,它们侧重于右半球^{⑨⑩}。汉语词汇声调既包含声学信息,也包含语音信息,因此,根据这一假设,汉语声调加工涉及两个半球,以处理这两种不同的信息。另一种理论是声学假设,认为声调加工的大脑偏侧化取决于听觉输入的声学特性。音高信息中包含的频谱变化通常在右脑加工,而元音中包含的时间变化则在左脑加工^{⑪⑫}。根据这一假设,汉语声调中的声学对比和语音对

① Gandour, J. (2006). Brain mapping of Chinese speech prosody. *Handb. East Asian Psycholinguist* 1: 308-319.

② Jongman, A., Wang, Y., Moore, C. B., and Sereno, J. A. (2006). "Perception and production of Mandarin Chinese tones," in *Handbook of East Asian Psycholinguistics* (Vol. 1: Chinese), eds P. Li, L. Tan, E. Bates and J. L. Tzeng (Cambridge: Cambridge University Press): 209-217.

③ Gandour, J., Wong, D., Hsieh, L., Weinzapfel, B., Van Lancker, D., and Hutchins, G. D. (2000). A crosslinguistic PET study of tone perception. *J Cogn Neurosci* 12: 207-222.

④ Klein, D., Zatorre, R. J., Milner, B., and Zhao, V. (2001). A cross-linguistic PET study of tone perception in Mandarin Chinese and English speakers. *NeuroImage* 13: 646-653.

⑤ Zhang, L., Xi, J., Xu, G., Shu, H., Wang, X., and Li, P. (2011). Cortical dynamics of acoustic and phonological processing in speech perception. *PLoS One* 6: e20963.

⑥ Wang, X. D., Wang, M., and Chen, L. (2013). Hemispheric lateralization for early auditory processing of lexical tones: dependence on pitch level and pitch contour. *Neuropsychologia* 51: 2238-2244.

⑦ Luo, H., Ni, J. T., Li, Z. H., Li, X. O., Zhang, D. R., Zeng, F. G., et al. (2006). Opposite patterns of hemisphere dominance for early auditory processing of lexical tones and consonants. *Proc Natl Acad Sci USA* 103: 19558-19563.

⑧ Xi, J., Zhang, L., Shu, H., Zhang, Y., and Li, P. (2010). Categorical perception of lexical tones in Chinese revealed by mismatch negativity. *Neuroscience* 170 (1): 223-231.

⑨ Van Lancker, D. (1980). Cerebral lateralization of pitch cues in the linguistic signal. *Paper Linguist* 13: 201-277.

⑩ Wong, P. (2002). Hemispheric specialization of linguistic pitch patterns. *Brain Res Bull* 59: 83-95.

⑪ Zatorre, R. J., Belin, P., & Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex: Music and speech. *Trends Cogn Sci* 6: 37-46.

⑫ Zatorre, R. J., & Belin, P. (2001). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex* 11: 946-953.

比都是频谱变化,因此声学处理和语音处理都侧重于右半球。

基于这些关于大脑偏侧化的观点,Gandour 等人提出了一个综合性假设^{①~③}。他们认为,词汇声调加工涉及两个半球,取决于加工过程中所涉及的信息类型。具体来说,对于同样的词汇声调,左半球更多地参与语义加工,而右半球则更多地参与音高信息的声学加工。鉴于词汇声调的加工涉及声学信息和语音信息(其具有语义区分功能)的加工,这一假设表明,大脑加工声调并没有简单的偏侧化模式。

因此,这里要考虑的关键问题是,加工涉及的是声调的声学特征还是语音特征。Luo 等人(2006)使用失匹配负波(MMN)来研究声调加工的特征。MMN 是一种强大的方法,用于检查声学 and 语音加工的早期阶段,正如之前的研究所表明的那样。MMN 是一种电生理成分,反映了大脑对偏差模式的自动检测,通常在刺激开始后 200~250ms 达到峰值,主要在前中央区域。MMN 反应可以通过 Oddball 范式诱发,其中几个不常见的偏差刺激嵌入在频繁的标准刺激中进行听觉呈现。Luo 等人发现,在右半球中,由声调偏差引发的 MMN 平均幅度大于左半球。他们的结论是,在前注意阶段,即人们未意识到刺激的详细特征的自动加工阶段,听者主要加工词汇声调的声学信息。在这一阶段,加工通常侧重于右半球。在声调加工的第二阶段,即注意阶段,人们有意识地加工呈现的刺激时,听者倾向于通过左半球加工声调的语义信息。Luo 等人的新发现是,汉语词汇声调的认知加工是否涉及两个半球将取决于不同的加工阶段。因此,MMN 为加工的时间进程提供了一个极好的测量方法,有助于进一步了解词汇声调加工^④。

Hsu 等人(2014)在一项脑磁图(MEG)研究中,揭示了神经发生源在检测不同大小的声调变化中的功能作用。与差别较小的 T2、T3 相比,声学上差别更大的 T1、T3 刺激对在左半球显示出更大的 MMN。最重要的是,源分析表明,偏差大小影响了颞叶和额叶皮层激活的偏侧化和时间进程。大偏差在颞上回和颞中回显示出更强的左侧化,同时,一组额叶生成器在更晚的时间窗口内对小偏差产生反应,反映了在应对大偏差和小偏差时不同的自上而下机制^⑤。

① Gandour, J., Wong, D., Hsieh, L., Weinzapfel, B., Van Lancker, D., and Hutchins, G. D. (2000). A crosslinguistic PET study of tone perception. *J Cogn Neurosci* 12: 207-222.

② Gandour, J., Tong, Y., Wong, D., Talavage, T., Dziedzic, M., Xu, Y., et al. (2004). Hemispheric roles in the perception of speech prosody. *NeuroImage* 23: 344-357.

③ Gandour, J. (2006). Brain mapping of Chinese speech prosody. *Handb. East Asian Psycholinguist* 1: 308-319.

④ Luo, H., Ni, J. T., Li, Z. H., Li, X. O., Zhang, D. R., Zeng, F. G., et al. (2006). Opposite patterns of hemisphere dominance for early auditory processing of lexical tones and consonants. *Proc Natl Acad Sci USA* 103: 19558-19563.

⑤ Hsu, C. H., Lin, S. K., Hsu, Y. Y., & Lee, C. Y. (2014). The neural generators of the mismatch responses to Mandarin lexical tones: An MEG study. *Brain Research* 1582: 154-166.

2. 范畴化

除了汉语声调加工的偏侧化争论,研究者还强调了声调的范畴化感知的重要性。范畴化感知是指人类听者能够将连续的声学信号感知为离散的语言表征的能力:听者对不同语音范畴之间的边界敏感,但对同一语音范畴内的声学变化不敏感。此前的研究者广泛研究了范畴化知觉差异,主要集中在音段特征(如辅音和元音)上,但对超音段特征(如声调)的研究十分稀少。有研究者发现,词汇声调的感知同样显示出范畴化知觉:声调语言的母语者对范畴间声调变化比范畴内变化更敏感。

Chan 等人在 1975 年的研究发现,汉语被试对声调感知加工是范畴化的^①。随后,王士元等人使用合成的汉语声调一声(高平)和二声(高升)连续体,采用的实验任务为识别和区分任务,也证明汉语被试对声调表现为范畴化感知^②。Hallé 等人通过比较中国台湾人和法国人的声调加工发现,中国台湾人的声调感知是类范畴化的,法国人的声调感知是依靠物理属性的^③。近年的一些研究都发现了声调感知的范畴化加工特点^④。但是关于声调加工范畴化的结论还不是很一致, Abramson 等人(1970)对泰语声调进行考察发现,泰语被试对整个语音连续体的分辨率基本相同,因此他们认为泰语声调的感知不是范畴化的。对比以上结果发现,使用汉语声调研究容易得到声调范畴化加工的结果。而在泰语声调研究中使用的是声调高低变化的三个声调,在汉语声调研究中使用的是旋律(contour)发生变化的声调。针对这一问题,Francis 等人使用了既包含声调高低变化又包含旋律变化的广东话进行研究,对于高低型声调知觉加工类似于元音知觉,不是范畴化的;但是对旋律型声调加工类似于辅音加工,是范畴化的,因此,他们认为声调的范畴知觉是类范畴化的^⑤。本研究关注的就是儿童汉语声调范畴化知觉的发展情况。

Xi 等人(2010)使用 MMN 研究了汉语声调的范畴化视觉。研究者发现,虽然声调的范畴间和范畴内变化都在双侧前中央区域引发了 MMN,但范畴间变

① Chan, S. W., Chuang, C. K., & Wang, W. S. Y. (1975). Cross-linguistic study of categorical perception for lexical tone. *Journal of The Acoustical Society of America* 58: S119-S119.

② Wang, W. S. Y. (1976). Language change. *Annals of the New York Academy of Sciences* 280: 61-72.

③ Hallé, P. A., Chang, Y.-C., & Best, C. T. (2004). Identification and discrimination of Mandarin Chinese tones by Mandarin Chinese vs. French listeners. *Journal of Phonetics* 32 (3): 395-421.

④ Xu, Y. S., Gandour, J. T., & Francis, A. L. (2006). Effects of language experience and stimulus complexity on the categorical perception of pitch direction. *Journal of the Acoustical Society of America* 120 (2): 1063-1074.

⑤ Francis, A. L., Ciocca, V., & Ng, B. K. C. (2003). On the (non) categorical perception of lexical tones. *Perception & Psychophysics* 65 (7): 1029-1044.

化在左半球引发的 MMN 大于右半球, 而范畴内变化在右半球引发的 MMN 大于左半球。这些模式支持了声调的范畴化知觉, 同时也为涉及两个半球参与声调处理的假设提供了证据, 即范畴内刺激的处理主要涉及音高信息的声学处理, 而范畴间刺激的处理主要涉及语音信息^①。此外, 在 MMN 的时间窗口 (200 ~ 250ms) 内, 声学信息和语音信息是并行处理的, 这与 Luo 等提出的两阶段假设不一致^②。

Zhang 等人 (2011) 的一项 fMRI 研究进一步表明, 声学处理和语音处理在两半球中的相互作用: 范畴间变化在左侧颞中回引发了较强的激活, 而范畴内变化在右侧颞上回引发了较强的激活^③。这些 fMRI 发现表明, 低级别的声学分析 (范畴内) 受高级别的语音表征 (范畴间) 的调节, 因此与 Xi 等人 (2010) 报告的 MMN 发现一致并互为补充。在另一项关于注意阶段声调范畴化知觉的 ERP 研究中, Zhang 等人 (2012) 发现范畴内刺激和范畴间刺激的有意识处理涉及 N2b 和 P3b 成分^④。数据与 Xi 等人 (2010) 的反应模式一致: 对于 N2b 和 P3b, 范畴间刺激在左侧记录点引发的反应大于右侧, 而范畴内刺激在两个半球中引发的反应相同。

这些声调范畴化知觉的发现也对理解加工障碍具有重要意义。例如, Zhang 等人 (2012b) 发现, 存在阅读障碍风险的汉语儿童在范畴间和范畴内刺激之间没有显著差异, 这与成人和年龄匹配的正常发育儿童形成对比。可能是这些有阅读障碍的儿童在感知语音信息时, 其处理方式与感知声学信息相同^⑤。

一个仍然不清楚的重要问题是, 声调的声学信息和语音信息在根本上是不同类型的信息, 还是说它们只是一个连续体上的不同, 仍属于相同类型的信息。正如功能性假设所建议的那样, 汉语词汇声调中包含的音高信息可以根据它是作为声学信号还是语音单元来分为两种类型: 这两种类型是不同的, 并且在认知处理上也有不同的后果。Gandour 等人 (2000) 进一步区分了纯声学特征与声学特征加上语义特

① Xi, J., Zhang, L., Shu, H., Zhang, Y., and Li, P. (2010). Categorical perception of lexical tones in Chinese revealed by mismatch negativity. *Neuroscience* 170: 223-231.

② Luo, H., Ni, J. T., Li, Z. H., Li, X. O., Zhang, D. R., Zeng, F. G., et al. (2006). Opposite patterns of hemisphere dominance for early auditory processing of lexical tones and consonants. *Proc Natl Acad Sci USA* 103: 19558-19563.

③ Zhang, L., Xi, J., Xu, G., Shu, H., Wang, X., and Li, P. (2011). Cortical dynamics of acoustic and phonological processing in speech perception. *PLoS One* 6: e20963.

④ Zhang, L., Xi, J., Wu, H., Shu, H., and Li, P. (2012a). Electrophysiological evidence of categorical perception of Chinese lexical tones in attentive condition. *NeuroReport* 23 (1): 35-39.

⑤ Zhang, Y., Zhang, L., Shu, H., Xi, J., Wu, H., et al. (2012b). Universality of categorical perception deficit in developmental dyslexia: An investigation of Mandarin Chinese tones. *J Child Psychol Psychiatry* 53: 874-882.

征在汉语和泰语等词汇声调感知中的作用^①。与上述不同的观点是，在认知处理上，声学信息和语音信息之间没有根本区别：声调中的音高对比是频谱变化，无论其具体特征如何，这些对比的处理始终涉及相同类型的声学分析。这种替代观点表明，声学信息和语音信息的基本特征都存在于频谱变化中，因此在神经机制上是相似的，语音信息的处理和声学信息的处理都涉及相同的神经模式，且都在右半球进行。这个论点与声学处理和语音处理的不同神经相关性的观点形成对比。

Xi 等人 (2010)^② 和 Zhang 等人 (2011)^③ 使用的刺激材料取自汉语词汇声调连续体，从升调（声调 2，“pa2”）到降调（声调 4，“pa4”）。两种声调之间的差异可以根据 F0 轮廓在声学上进行操控，以产生一系列中间声调，形成从刺激 1 到刺激 11 的连续体。先前的研究主要关注声调的范畴化知觉，因此他们的实验中只使用了刺激 3、7、11。在 Yu 的研究中，继续使用这 11 个刺激集，但在实验中加入刺激 5 和 9，以产生一个涉及语音范畴和声学间隔的正交设计^④。这个设计可以系统地测试声学信息与语音信息在汉语词汇声调加工中的作用，包括声学信号中的小间隔和大间隔差异，以及语音范畴中的范畴内和范畴间差异。结果发现，音位范畴对 MMN 峰值潜伏期有显著的主效应，而音位范畴和声学间隔对 MMN 的平均振幅都有主效应。结果表明，声学信息和音位信息在汉语词汇声调处理中的作用不同：声学信息仅影响声调处理的程度，而音位信息则影响声调处理的程度和时间进程。一些研究认为，由声调变化引发的 MMN 可能来源于汉语词汇声调的长期记忆痕迹。Chandrasekaran 等人 (2007a) 评估了汉语听者和英语听者对与汉语词汇声调相似的音高变化的非语言刺激的不同 MMN 反应。他们的结果显示，汉语听者比英语听者的 MMN 反应更大，这表明相同的非语言刺激中的音高变化可能会激活汉语听者的词汇声调的长期记忆痕迹^⑤。由同时包含语义变化和声学变化的刺激引发的 MMN 比仅包含声学变化的刺激在平均振幅上更大且更早。似乎声调的长期记忆表征可能对这些模式有贡献。因此，基于 Chandrasekaran 等人的发现，长期的音位记忆痕迹的激活可能在增强声调感知方面起到了重要作用。

① Gandour, J., Wong, D., Hsieh, L., Weinzapfel, B., Van Lancker, D., and Hutchins, G. D. (2000). A crosslinguistic PET study of tone perception. *J Cogn Neurosci* 12: 207-222.

② Xi, J., Zhang, L., Shu, H., Zhang, Y., and Li, P. (2010). Categorical perception of lexical tones in Chinese revealed by mismatch negativity. *Neuroscience* 170: 223-231.

③ Zhang, L., Xi, J., Xu, G., Shu, H., Wang, X., and Li, P. (2011). Cortical dynamics of acoustic and phonological processing in speech perception. *PLoS One* 6: e20963.

④ Yu, K., Wang, R., Li, L., & Li, P. (2014). Processing of acoustic and phonological information of lexical tones in Mandarin Chinese revealed by mismatch negativity. *Frontiers in Human Neuroscience* 8: 729.

⑤ Chandrasekaran, B., Krishnan, A., and Gandour, J. T. (2007a). Experience dependent neural plasticity is sensitive to shape of pitch contours. *NeuroReport* 18: 1963-1967.