汉字刺激质量和频率在 N400 上的交互

王彤彤 周美玲 王权红*
（西南大学心理学部，认知与人格教育部重点实验室，重庆，400715）

摘 要 采用事件相关电位，运用无启动的同一字判断延迟范式，以大学生为被试探讨汉字刺激质量和频率是否具有交互作用。行为结果显示，刺激质量和频率在反应时上存在交互作用。脑电结果显示，重度模糊诱发了更大的 N250 和 N400，且刺激质量和频率在 N400 上存在交互作用。结论是，汉字刺激质量和频率在反应时和 N400 上存在交互作用，表明在汉字识别中存在高低层次间的交互加工，支持交互激活模型。

关键词 刺激质量 频率 交互加工 IA 模型 N400 N250

1 引言

在词汇识别的研究中，无阈限串级加工(cascaded processing) 和有阈限、模块化加工已经争论数十年，并且在交互激活（IA）模型 (McClelland & Rumelhart, 1981) 和多阶段模型 (Borowsky & Besner, 1993) 中有所体现。无阈限串级加工认为，词汇识别是指在 IA 中低层次的加工由于轻微的激活都可“倾泻”即全部传播到较高层次上去，并以同样方式返回，从而造成各层次相当于同一阶段，不可分离。根据因素相加法则，在 IA 模型中体现的是两加工在统计学上具有交互作用，因此我们也可以将这种串级加工理解并称为交互加工。有阈限、模块化加工则认为，高、低层次为无交互的模块，两者无统计上的交互作用，它们作用于不同阶段 (Sternberg, 1969)。争论经常涉及低层次的刺激模糊度与高层次语义加工的字频、启动、语境等变量在因素联合实验中是否有统计上的交互作用的问题。

IA 模型主要包括由低到高的三个层次的字形加工。低层次的字形加工和下一阶段的语义加工层次发生交互。Meyer, Schvaneveldt 和 Ruddy(1975) 和 Balota, Yap, Cortese 和 Watson(2008) 的研究就显示，模糊度与语境有统计上的交互作用，说明低层次的字形加工与高层次的语义加工发生了交互。另一方面，Becker (1979) 证实，同属高层的语境和词频有交互作用，支持 IA 模型。因为语境和词频均与 IA 模型的静息激活水平有关，IA 模型认定语境和词频同属一层次，所以文献还认为 IA 模型会预期：凡是与语境有交互作用的因素也会与词频产生交互作用。这是因为，由于语境和词频甚至同属高层次变量，与语境处于同一阶段的也会与词频处于同一阶段。例如，模糊度与语境处于同一阶段 (Meyer et al.，1975)，所以模糊度与频率处于同一阶段，于是，根据因素相加法则，模糊度应与频率有交互作用 (Borowsky & Besner, 1993)。然而模糊度与频率却频频表现出无交互作用，IA 模型因此受质疑 (Balota, Aschenbrenner, & Yap, 2013)，但这些无交互作用的结果却更符合多阶段模型的预期 (Borowsky & Besner, 1993)。多阶段模型的加工方式是模块化的，因而模糊度与语义加工是分离的、甚至是无交互的，于是模糊度和词频作用于不同的阶段，统计上应表现出无交互作用。它们干脆把难以解释的模糊度与语境的交互作用，解释为自上而下的附加反馈对模糊度字形加工的影响。在已有的英文语义加工相关研究中，拼音文字的语义提取在很大程度上依赖语音作为中介 (Newman & Connolly, 2004)。因而语音削弱了 IA 模型里英文刺激模糊度字形加工与语义加工的交互，导致英文单词研究中很少出现模糊度与频率交互作用 (Balota et al., 2013)。

相反，在针对语音作用的研究中，虽然有证据说明语音激活在汉字语义通达中具有重要作用 (Perfetti, Liu, & Tan, 2005)，但是语音不是语义激活所必需的成份 (孔令跃 , 康翠萍 , 穆彦丁 , 2012; Zhang, Xiao, & Weng, 2012)。语音的作用只在某些条件下出现，如识别规则字等 (Zhou & Marslen-Wilson,

* 通讯作者：王权红。E–mail：quanhong177@yahoo.com
DOI:10.16719/j.cnki.1671–6981.20180209

1999)。此外，一些具有语音加工缺陷的脑损伤病人在理解视觉汉字时，仍能够正确无误 (Bi, Han, & Zhang, 2009)。另一方面，研究表明，汉字命名反应速度随频率（字频）上升而上升（郭德俊 , 彭聃龄 , 张素兰，1991），甚至存在启动范式下的汉字模糊度与频率的交互作用 (孙海静 , 王权红，2012)，表明汉字高、低层次加工的交互。已有事件相关电位（ERP）研究也表明了汉字加工的这种交互。例如，汉字字体还能改变 N400 波幅 (Lv & Wang, 2012)。N400 成分是一个在刺激呈现后的 400 ms 左右达到最大，并分布于头皮中顶部的中晚期脑电负成分 (Kutas & Hillyard, 1980)。N400 被认为是反映语义整合、词义提取难度的指标 (Kutas & Federmeier，2011)。英文模糊度的影响却仅限于早期加工，不能直接影响语义加工 (Borowsky & Besner, 1993)。英文模糊度只能改变反应时，不能改变 N400 波幅 (Holcomb, 1993), 这恰好说明英文字形加工不足以与语义加工发生交互，因而模糊度才不能改变 N400 波幅。N400 字体效应是刺激质量效应，反映字形加工与语义加工的交互。

也许有人认为 N400 字体效应只是频率效应。相比之下，模糊度加工更能反映字的早期加工，低层次的字形变量模糊度与高层次语义加工变量频率的交互作用也是国外研究的热点。因此，为了进一步检验交互式加工，本研究采用 ERP 技术和延迟反应的同一字判断范式，主要考察汉字的模糊度与频率在 N400 波幅上是否有交互作用。该范式首先呈现一个靶字，而后呈现一个探测字，被试的任务是判断二者是否为同一个字，与此同时，记录靶字的电位。这种方法可以控制 P300 (Deacon, Dynowska, Ritter, & Grose-Fifer, 2004) 等额外因素的产生。根据假设，汉字语义加工不存在语音中介，高低层次的交互不受额外因素的影响。因此，模糊度与频率将在 N400 波幅上的交互作用对应于 IA 模型交互加工，而无交互作用则对应于多阶段模型的无交互，即完全分离。

2 方法

2.1 被试

某大学在校生 19 人（男生 10 人），被试年龄 19~25 岁，平均 21 岁，均为右利手、视力正常，未参加过类似实验，无生理或精神病史。实验后给予被试适当实验报酬。

2.2 实验设计与材料

因素相加实验利用刺激质量（模糊 5、6）× 字频 (高、低频) 的被试内设计。从《现代汉语频率词典》（1986）中选取高、低频汉字各 240 个，高频汉字（字频范围为 2765~376[每百万 , 下同]， 笔画范围为 6~12 画）、低频汉字（字频范围为 20~11，笔画范围为 6~12），且高低频汉字之间差异显著（t = 25.432，p <.001）；笔画数差异不显著（t=.72，p>.05）。从中各随机抽取 160 个汉字作为靶刺激，剩余高、低频字作为探测刺激。

采用 Macromedia Flash 8 软件制作汉字图片，靶字以 50 号宋体输入，每个平滑图片以 245 × 245 像素的 bmp 格式文件单独导出，刺激质量采用 Picfrag 程序对靶刺激进行模糊处理实现。该程序是用大小为 16 × 16 像素的随机点覆盖图像，所得图片分为轻度和重度模糊字，其未被覆盖的部分大约分别为 .49 和 .34。用 Photoshop 8 对图片进行像素大小处理，刺激最终为 45 × 45 像素黑底模糊白字（模糊度 6、5 的“作”：、）。探测字为 50 号楷体，以 60 × 60 像素的 bmp 格式文件导出并最终反相成黑底白字（如 ）。靶字和探测字使用不同字体字号，以防止被试仅根据局部特征作出同一字判断。图片在 17 英寸的黑色显示屏上呈现，距离被试眼睛 80 厘米，水平和垂直视角均为 1.4 度。

2.3 实验程序

采用 E-Prime 进行编程，每个测试以屏幕的中央 500 ms 的白色“+”注视点开始，直到出现 250 ms 的清晰字（探测字）及空屏结束。要求被试在清晰字呈现后，判断模糊字和清晰字是否是同一个字。靶刺激中一半设计为相同字按键，一半为不同字按键，一半“是”反应为“F”键，“否”反应为“J”键；另一半被试则反过来。在按键后或 1500 ms 后关闭空屏 , 并开始呈现另一个试次。为使实验达到平衡，所有实验程序中进行轮转 (模糊度在项目上的轮转，是、否反应的轮转，高、低频探测字的轮转），每个实验程序将 320 个试次分为 5 个组块，每个组块中有 64 个试次。每两个组块之间被试可休息。正式实验前有练习。

2.4 脑电记录与数据分析

靶字的脑电波采用德国 Brain Products 公司的 64 导电极帽记录并分析，右眼眶外侧记录水平眼电（HEOG），下部记录垂直眼电（VEOG），以双耳乳突连线为参考电极，以 FPz 和 Fz 连线的中

点为接地点。滤波带通为 0.01~100Hz，采样频率为 500Hz，每个电极点的头皮电阻在 5kΩ 以下。完成连续记录脑电后离线处理数据。记录时程为 1000ms，以 -200~0ms 作为基线进行校正，选择靶字呈现后的 800ms 作为分析时程。对重度模糊高频、重度模糊低频、轻度模糊高频、轻度模糊低频四种条件正确反应的脑电波分别进行叠加，平均叠加次数分别为 61、60、69、65。自动校正 VEOG 和 HEOG，且因眼电伪迹和其他伪迹产生的振幅在 ±80μv 之外的波在叠加中自动剔除。

图 1 表明约在 200~300 和 300~500ms 时间窗口，四种条件均诱发了两个较为明显的负波。首先，在前一窗口，无论是高频还是低频，相比于轻度模糊，重度模糊均诱发了更大的波幅，其头皮分布主要在额叶中部，该成分很可能是 N250。然而，无论是轻度还是重度模糊，频率之间的波幅差异要小些，说明可能只有 N250 模糊度效应。其次，经典 N400 的窗口（300~500ms）似乎显示，N400 的潜伏期因模糊而延迟到了 400~500 ms 窗口，且仅在此窗口，低频条件下的模糊度差异较高频条件下的大。这很可能就是刺激质量与字频的交互作用。

由于本研究需要分析的电极较多，所以为了更好地利用电极数据，需要把密集的电极分成几个小区。因此，本研究根据波形结果，参照常规的 N250 和 N400 的研究 (Grainger & Holcomb, 2006) 的电极分区方法，将全头皮电极分为中线、1、2、3 区共四个区域：中线 (Fz, Cz ,Pz, Oz，Fpz, CPz, POz, FCz), 1 区 (FC1/2[即 FC1,FC2], C1/2/3/4, CP1/2), 2 区 (F1/2/3/4, FC3/4/5/6, C5/6, CP3/4/5/6, P1/2/3/4), 3 区 (Fp1, AF3, AF7, F5, F7, FT7, T7,TP7, P5, P7 ,PO3, PO7, O1, Fp2, AF4, AF8, F6, F8, FT8, T8, TP8, P6, P8, PO4, PO8, O2)。并使用三因素重复测量方差检验逐区域重点对 220~280 ms、400~500 ms 两个时间窗口的平均波幅进行分析。其中，自变量分别为刺激

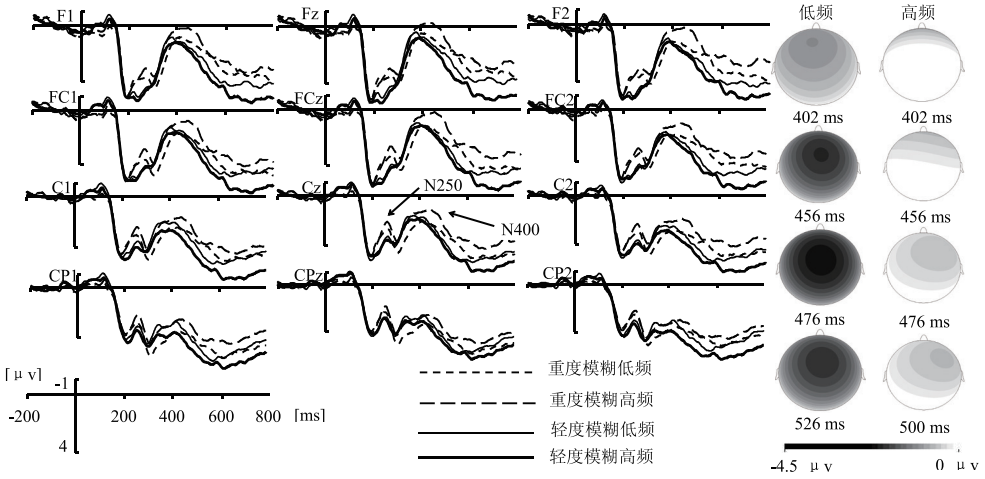


图 1 四种条件下的平均波幅图及不同频率下刺激质量差异波（重度模糊 - 轻度模糊）地形图

质量，频率，电极点。所有方差分析结果均采用 Greenhouse-Geisser 进行校正。

3 结果

3.1 行为结果

四种条件正确率和正确反应的平均反应时见表 1。采用两因素重复测量方差分析，对正确反应的平均反应时和正确率进行分析：

在反应时上，刺激质量和频率的交互作用显著 [F(1，18)=8.18，p<.05，η^2=.31]，进一步的简单效应分析显示，低频条件下的重度模糊的反应时显著长于轻度模糊（p<.001），高频条件下的重度模糊和轻度模糊的反应时差异边缘显著 [F(1，18)=4.27，p=.05，η^2=.19]，重度模糊的反应时略长于轻度模糊。刺激质量和频率的主效应均显著（p<.05），低频的反应时长于高频反应时。在正确率上，刺激质量和频率的交互作用不显著 [F (1，18)=1.11，p=.31，η^2=.06]；刺激质量和频率的主效应显著（p<.001），轻度模糊的正确率高于重度模糊正确率；低频的正确率低于高频的正确率。

3.2 脑电结果

220~280ms 该窗口的平均波幅多因素重复测量方差分析显示：刺激质量的主效应在中线 [F(1，18)=16.63，p<.01，η^2=.48]，1~3 区均显著（p<.01），重度模糊诱发了更大的 N250。

400~500ms 中线：刺激质量和频率的交互作用

表 1　四种条件下同一字判断的正确率和正确判断的平均反应时（*ms*）

	重度模糊		轻度模糊	
	高频	低频	高频	低频
反应时	589(125)	612(121)	574(113)	579(113)
正确率	.83(.06)	.81(.05)	.95(.02)	.91(.04)

注：括号内为标准差

不显著 [F(1，18)=.19，p=.67，η^2=.01]；刺激质量、频率、电极点的三重交互作用显著（p<.05）；进一步分析表明刺激质量和频率的交互作用在电极点 CPz 上显著 (p<.05)。1 区：刺激质量和频率的交互作用不显著（p=.09）；但是，刺激质量、频率、电极点的三重交互作用显著（p<.05）；进一步分析表明刺激质量和频率的交互作用在 CP1，C4，CP2 上显著（p<.05）。当中线的 Pz，CPz 和 1 区中相邻的 CP1，C2，C4，CP2 进行跨区合并时，刺激质量和频率的交互作用显著（p<.05），符合经典 N400 的头皮分布；简单效应分析结果显示，在低频条件下，重度模糊诱发了更大的 N400（p<.05），在高频条件下，简单效应不显著 F< 0。2 区：刺激质量和频率的交互作用不显著（p=.23）；三重交互作用不显著（p =.07）。刺激质量的主效应显著 [F(1，18)=7.76，p<.05，η^2=.30]。3 区：刺激质量和频率的交互作用不显著（p=.41）；三重交互作用也不显著（p=.19）。

4　讨论

本研究中模糊度与频率在反应时，尤其是在中晚期的 N400 波幅上表现出统计上的交互作用，这些结果支持汉字字形与语义加工交互的假设，因而也明确地支持 IA 模型的交互加工，不支持多阶段模型的无交互加工。

汉字模糊度和频率在反应时上的交互作用显著，说明刺激质量和频率作用于同一加工阶段，这一结果还与启动范式下反应时上的汉字模糊度与频率的交互作用的结果一致 (孙海静 , 王权红，2012)。这些反应时上的交互作用还说明汉字字形加工与语义加工发生交互，符合汉字交互加工不受语音中介较大影响的假设。

在 400~500ms 时间窗口内，四种条件均诱发了负波，它们的最大差异波主要集中在头皮中、顶部稍偏右的电极点上，符合典型的 N400 头皮分布，而且模糊度和频率有交互作用。简单效应分析表明，中低频字条件下的重度模糊比轻度模糊诱发了更大的 N400 波幅，这一结果与前人的启动范式下中低频汉字 N400 模糊度效应以及 N400 字体效应一致 (董静 , 2014; Lv & Wang, 2012)。这些结果表明，与英文不同，汉字的模糊度能改变反应时和 N400 波幅，N400 模糊度效应和模糊度与频率的交互作用一样可以独立地说明汉字字形加工与语义加工的交互。除此之外还可以推测，词汇的识别会与字体的结构方式和频率选择范围有一定的关系。因此会出现只有低频字的加工受到了模糊度影响这一结果。

汉字刺激模糊度和频率在中晚期 N400 上的交互作用显示二者作用于同一“中晚期”加工阶段。由于频率和模糊度分属高低层次加工，这意味着模糊度的加工足以与频率有关的语义加工发生交互，它们的加工就像发生在同一阶段，符合 IA 模型关于交互加工的预期。这是因为，字形的激活因为无阈限限制而从字形层较早地“倾泻”到与频率有关的语义层，在语音中介较弱的情况下尤其如此，从而使模糊度和字频产生交互作用。而按照多阶段模型，尽管汉字可以直接提取语义，但是字形加工、语义提取的各个加工阶段是真正分离的、即无交互的，模糊度的影响则局限于早期的字形加工，因此，二者应表现为无交互作用。显然，本实验的反应时结果，特别是在 N400 上表现出刺激质量和频率的交互作用的结果，对多阶段模型的适宜性产生了质疑。

结果还发现在 220~280 ms 时间窗口，相比于轻度模糊，高、低频的重度模糊均诱发了更大的负成分，在头皮前部及中顶部偏前的电极点上波幅最大，这一成分很可能是 N250。N250 是刺激呈现在 250ms 左右出现的达到峰值的负走向波，研究者认为 N250 模糊度效应可能和初级正字法加工有关。Grainger 和 Holcomb(2009) 认为 N250 反映了掩蔽启动范式中，由启动刺激与靶刺激分别激活的表征在正字法上的失匹配程度，即正字法失匹配程度越大，其波幅越大。例如，和 teble-TABLE 相比，mouth-TABLE 失匹配程度更大，诱发的 N250 更大。经过初步分析，我们认为在本研究中模糊靶刺激激活的初级正字法表征（类似于上述启动刺激）与靶刺激的内部词汇

表征（类似于上述靶刺激）的失匹配程度可能是改变 N250 波幅的原因。这还有待于进一步的研究。

5 结论

（1）重度模糊汉字比轻度模糊汉字诱发了更大的 N400；（2）汉字模糊度与频率在反应时和 N400 上均存在交互作用，表明汉字字形加工比英文字形加工更足以与语义加工发生交互，符合 IA 模型的预期；（3）重度模糊诱发了更大的 N250。

参考文献

董静 . (2014). *语义相关比例对汉字刺激质量与语义启动交互作用的影响* . 西南大学硕士学位论文 .

郭德俊，彭聃龄，张素兰 (1991), *普通心理和实验心理学研究* . 成都 : 四川科学出版社 .

孔令跃，康翠萍，穆彦丁 (2012). 汉字语义通达中语音的激活与作用 . *心理学进展，2(5),* 229–235.

孙海静，王权红（2012）. 汉字模糊度、字频和语义启动在 N400 上的的交互作用：N400 的 IA 的模型上的证据 . *心理学报 , 44(6),* 745–753.

Balota, D. A, Aschenbrenner, A. J, & Yap, M. J. (2013). Additive effects of word frequency and stimulus quality: The influence of trial history and data transformations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 39(5),* 1563–1571.

Balota, D. A., Yap, M. J., Cortese, M. J., & Watson, J. M. (2008). Watson, Beyond mean response latency: Response time distributional analyses of semantic priming. *Journal of Memory and Language, 59(4),* 495–523.

Becker, C. A. (1979). Semantic context and word frequency effects in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 5(2),* 252–259.

Bi, Y. C., Han, Z. Z., & Zhang, Y.M. (2009). Reading does not depend on writ ing, even in Chinese. *Neuropsychologia, 47(4),* 1193–1199.

Borowsky, R., & Besner, D. (1993). Visual word recognition: A multistage activation model. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 19(4),* 813–840.

Deacon, D., Dynowska, A., Ritter, W., & Grose–Fifer, J. (2004). Repetition and semantic priming of nonwords: Implications for theories of N400 and word recognition. *Psychophysiology, 41(1),* 60–74.

Grainger, J., & Holcomb, P. J. (2009). Watching the word go by: On the time–course of component processes in visual word recognition. *Language and linguistics compass, 3(1),* 128–156.

Holcomb, P. J. (1993). Semantic priming and stimulus degradation: Implications for the role of the N400 in language processing. *Psychophysiology, 30(1),* 47–61.

Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event–related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology, 62(1),* 621–647.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science, 207(4427),* 203–205.

Lv, C. X., & Wang, Q.H. (2012). Font effects of Chinese characters and pseudo–characters on the N400: Evidence for an orthographic processing view. *Brain and Cognition, 80(1),* 96–103.

McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review, 88(5),* 375–407.

Meyer, D. E., Schvaneveldt, R. W, & Ruddy, M. G. (1975). Loci of contextual effects on visual word recognition.In P. M. A. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), *Attention and performance V* (pp. 98–118). London: Academic Press.

Newman, R. L, & Connolly, J. F. (2004). Determining the role of phonology in silent reading using event–related brain potentials. *Cognitive Brain Research. 21(1),* 94–105.

Perfetti, C. A., Liu, Y., & Tan, L. H. (2005). The lexical constituency model: Some implications of research on Chinese for general theo–ries of reading. *Psychological Review, 112(1),* 43–59.

Snodgrass, J. G., & Hirshman, E. (1991). Theoretical explorations of the Bruner–Potter 1964 interference effect. *Journal of Memory and Language, 30(3),* 273–293.

Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta psychologica, 30*, 276–315.

Zhang, J. X., Xiao, Z., & Weng, X. (2012). Neural evidence for direct meaning access from orthography in Chinese word reading. *International Journal of Psychophysiology, 84,* 240–245.

Zhou, X. L., & Marslen–Wilson, W. (1999). Phonology, orthography, and semantic activation in reading Chinese. *Journal of Memory and Language, 41(4),* 579–606

Interaction of Stimulus Quality and Frequency on N400 in Chinese Characters

Wang Tongtong, Zhou Meiling, Wang Quanhong

(Faculty of Psychology,Southwest University,Key Laboratory of Cognition And Personality,Ministry of Education,Chongqing, 400715)

Abstract Decades of repeatedly found additive joint effects of stimulus quality and frequency comprise a challenge to the IAM which predicts an interactive joint effect, but there is evidence for the separation of orthographic and semantic processing. We propose that the separation results from the phonology processing that could function as an obstacle in alphabetic languages, which does not occur in Chinese language processing. This study investigated the joint effect of stimulus quality and frequency on N400 in Chinese characters which is an index of semantic processing to test the IAM and the discrete processing of the multistage activation models. Event-related brain potentials (ERPs) were recorded during a delayed character-matching task without semantic priming in healthy native Mandarin-speaking Chinese volunteers. The experiment took a 2 stimulus quality (highly blurred vs. slightly blurred) × 2 frequency: (high vs. low) within-subjects design. During the task, blurred target characters were first presented, followed by an intact probe character that either matched or mismatched the target character in identity. The participants were asked to press a button to judge whether the target, the stimulus, was identical to the current probe regardless of their font and blurredness. There were 320 trials in a procedure and all of them were delivered in five blocks of 64 trials each and the four experimental conditions were equally assigned at random to every block.

The behavioral data showed a significant interaction of stimulus quality and frequency on reaction time with a slower reaction time in the highly-blurred condition than the slightly-blurred one for low frequency, but not for high frequency. The ERP data showed a large negative-going wave that was similar to a typical N400 and higher for highly blurred than for slightly blurred stimuli near 400 ms post-stimulus onset with a broad scalp distribution. The largest blurredness effects were located in the right centro-parietal sites in a temporal window of 400 ms to 500 ms. More importantly, analyses exhibited a significant two-way interaction of stimulus quality and frequency in the centro-parietal scalp regions. Secondly, there was a larger negative-going wave in a time window of 200 to 300 ms, which was similar to the new N250. However, no interactions of blurredness and frequency were significant. In conclusion, the N400 blurredness effect which is larger for low frequency suggests that the stimulus quality can modulate the N400 because of cascaded processing. More importantly, an interaction of the stimulus quality and frequency on both RT and N400 suggests a strong cascaded processing in Chinese characters recognition, and provides evidence for the IAM but against the multistage activation model. Meanwhile, N250 amplitude was found to be larger for highly-blurred stimuli than for the elicited slightly-blurred ones. This N250 effect of stimulus quality was interpreted as reflecting the mismatch in pattern or stroke count between internal target representation and the stimulus input.

Key words stimulus quality, frequency, the cascaded processing, IAM, N400, N250