

儿童 Stroop 效应加工阶段特点的事件相关电位研究

彭聘龄 郭桃梅 魏景汉¹ 肖丽辉

(北京师范大学心理学院,北京 100875;中国科学院心理研究所¹,北京 100101)

摘要 选用小学六年级儿童为被试者,采用事件相关电位研究了 Stroop 效应的时程。实验中要求被试者判断在计算机屏幕中央出现的汉字颜色,并尽可能又快又准地按下相应的键,同时使用 32 导电极帽记录被试者的脑电信号。结果除了发现反应时的 Stroop 效应;还发现在汉字出现后大约 300 ms 左右,颜色与语义不一致的汉字诱发的 P300 比其它两种条件的波幅要大、潜伏期要晚;在汉字出现大约 400 ms 之后引发了一个慢波,不一致条件和控制条件引起的慢波波幅在头皮顶部比一致条件大。结果说明儿童 Stroop 效应的产生是一个复杂过程,干扰效应是早期颜色识别和后期反应选择两个阶段共同作用的结果,而促进效应则发生在后期的反应选择阶段。

关键词 Stroop 效应 事件相关电位(ERP) 颜色判断
中图分类号 Q427; **文献标识码** A

Stroop 效应是一种经典的心理现象。当要求被试者命名单词的颜色时,被试者的反应时会受到单词意义的影响。不一致条件(如红色的“绿”字)下的反应时会比控制条件(如红色的“贯”字)下的反应时长,这种现象通常称之为 Stroop 干扰效应;而一致条件(如红色的“红”字)下的反应时会比控制条件下的反应时短,这种现象通常称之为 Stroop 促进效应。

Stroop 效应的研究已经有了 60 多年的历史。近年来,随着正电子发射断层扫描(PET)和功能磁共振成像(fMRI)等脑成像技术的发展,探讨 Stroop 效应的神经机制成了研究的一个热点^[1,2]。研究显示,在 Stroop 任务中,前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)的激活是比较一致的发现,而其它的一些脑区,如前额叶、颞下回和顶下回也有激活^[2,3]。

与 PET 和 fMRI 的研究相比,事件相关电位(event related potentials, ERP)的研究则有利于揭示 Stroop 效应产生的时程。早期的研究主要以 P300 为指标,所选用的电极也比较少,由于没有发现不同实验条件在 P300 的潜伏期上有差异,这些研究者认为,Stroop 干扰效应发生在反应选择阶段,而不是在刺激识别评价阶段^[4~7]。最近的研究发现了更为复杂的 ERP 波形

变化,与其它条件相比,不一致条件在额顶部电极引起较大的正波,该正波在 500 ms 左右达到最大值。另外,不一致条件在双侧额中部电极处引起较大的负波,该负波从刺激出现后 500 ms 一直延续到 1 000 ms;这些成分可能反映了“发现和解决”冲突的加工过程^[8,9]。还有研究发现,在刺激出现后的 350—500 ms 内,不一致条件和一致条件下都在中后部电极处引起了一个负波,在 410 ms 左右达到最大值。偶极子溯源分析发现,该负波的发生源位于前扣带回,可能与冲突的发现和解决有关。刺激出现后的 500—800 ms 内,左侧颞、顶皮层的左上部电极记录到一个慢正波,该成分可能与单词意义的重新激活有关^[10]。

上述研究有助于我们了解 Stroop 效应的时程,但是所有的研究都是选择成人作为被试者,几乎没有儿童 Stroop 效应的脑机制研究。在 Stroop 效应的行为实验中,研究者早已发现,儿童被试者和成人被试者的 Stroop 效应大小是不一样的,说明儿童和成人的选择性注意特点可能存在差异^[1]。问题是,这种差异在脑的机制上是否也显示出来?本实验拟选用汉语的颜色字为实验材料,以儿童为被试者,探讨汉语 Stroop 效应的神经机制。在实验任务上,过去的行为实验大多采用命名任务,但是由于命名时肌肉运动可能给实验结果带来“污染”,我们像过去有关成人的 ERP 研究^[4~10]一样采用了按键判断任务。

2003年10月20日收到 攀登计划(95-专-09)、自然科学基金
通讯作者:彭聘龄 (30270462)和教育部文科研究基地项目资助

1 方法

1.1 被试对象

15 名小学六年级学生(年龄 11—12 岁,6 个男生,9 个女生)参加实验。皆右利手,没有生理或精神方面的疾病,视力或者矫正视力正常,非色盲,做完实验后获取适量报酬。

1.2 实验材料

实验材料为 4 个颜色字(红、黄、蓝、绿),另外选择了 4 个无关字(贯、奖、华、涂)作为为控制组。所有的字都用四种颜色写,这样得到 4 个颜色与语义一致的词(如红色的“红”字)、12 个颜色与语义不一致的词(如红色的“绿”字)、16 个颜色与语义无关的词(如红色的“贯”字)。颜色字和无关字的平均字频进行了匹配。汉字大小均为 28 号宋体,呈现于计算机 17 英寸屏幕中央。

1.3 实验步骤

实验在安静的实验室内进行,要求被试者通过按键来判断汉字的书写颜色。实验中要求被试者把左、右手的中指和食指分别放在按键板相应的 1、2、3、4 键上,每个键表示一种颜色,并贴着相应的色块。正式实验前先让被试者接受颜色-按键的训练,并完成一个简短的练习,以保证被试者在颜色和反应键之间建立起映射关系^[8,9]。

整个实验共有 6 个组块(block),每个组块有 96 个刺激(16 个一致、16 个中性和 16 个不一致的颜色汉字,并有 48 个星号作为注视点)。正式实验开始后,灰色屏幕中央先出现一个注视点,随后出现一个汉字,按随机顺序呈现,视觉距离大约 70 cm,呈现顺序如下:星号(注视点)呈现 800 ms,空屏 300 ms,汉字呈现 150 ms,然后是 1 750 ms 的空屏。实验时要求被试者尽量少动,尽量在注视点呈现时眨眼,而在汉字呈现时不眨眼;并要求被试者尽可能又快又准地进行反应。每做完一个组块休息一次,被试者可以根据自己的情况休息足够的时间。整个实验,包括电极帽放置和摘除的时间,大约持续 1.5 h。

1.4 EEG 记录和分析

使用美国 NeuroScan 公司生产的 ESI 128 导 ERP 工作站,选用 32 导放大器和 32 导电极帽记录 EEG,以双耳乳突的连线作为参考电极,同时记录水平眼电和垂直眼电。每个电极处的头皮电阻保持在 5 k Ω 以下。

滤波带通为 0.05—100 Hz,采样频率为 500 Hz/导。

分析时程为汉字出现后的 800 ms,基线为汉字出现前 200 ms,只对被试者做出正确反应的汉字所引起的 EEG 进行平均叠加。自动删除眼电等伪迹,波幅大于 $\pm 100 \mu\text{V}$ 的记录在叠加中被自动删除。根据本实验所得 ERP 成分和地形图,选择了两个时间窗口进行统计分析。第一时间窗口(汉字出现后 250—350 ms)包含了 P290 的波峰;第二个时间窗口(400—600 ms)包含了在 P290 之后出现的一个慢波。根据本研究中的 ERP 地形图对三个感兴趣的区域进行了统计分析,每一区域分别用三个电极记录作为代表:顶部区域(P3/Pz/P4)、中部区域(CP3/CPz/CP4)和前部区域(F3/Fz/F4)。因为 P290 在头皮顶部和中部区域记录到的波幅最大,所以选择了顶部和中部位置的电极。而本研究中各条件下的慢波似乎在头皮前部和顶部差别最大,因此选择了这些区域的电极。

最后,计算每个被试者每种实验条件在选定的时间窗口内的平均波幅,并计算波峰的潜伏期,即最大波幅对应的时间。对峰潜伏期和各个时间窗口的平均波幅分别进行重复测量的 ANOVA 分析。实验设计为两因素被试内设计,一个因素是刺激类型,包含 3 个水平(一致、不一致和控制条件),另一个因素是所选电极数。方差分析的 P 值均用 Greenhouse-Geisser 法矫正,矫正系数 ϵ 和 P 值会在后面的统计分析中报告。

2 结果

2.1 行为数据

超过 1 500 ms 的反应时被删除。被试者的平均反应时和错误率如表 1 所示。使用 SPSS 10.0 统计软件对这些数据进行了单因素方差分析,结果发现,三种实验条件下的错误率之间没有显著差异, $F(2,28)=1.5$, $P>0.1$;但是三种实验条件下的反应时之间存在显著的差异, $F(2,28)=12.1$, $P<0.001$ 。进一步的分析表明,Stroop 促进效应显著,一致条件下的反应时比中性条件下的反应时短 $P<0.005$;Stroop 干扰效应也显著,不一致条件下的反应时比中性条件下的反应时长 ($P<0.05$)。

2.2 脑电数据

三种条件下的 ERP 总平均图和脑地形图如图 1 所示。从图中可以看出,三种条件的区别发生在中部和顶部。在这些部位,汉字刺激引发了两个主要的

ERP成分。第一个成分是正成分,大约在200—400 ms之间,最大值出现在290 ms左右,左右两边明显。为了叙述方便,称之为P290。第二个成分是慢波,从400 ms开始出现一直持续到600 ms左右,中线较明显。为了叙述方便,称之为P400—600。慢波的分布比较广泛,几乎分布在头皮,在后部出现的慢波偏正向,而在前部出现的慢波偏负向。总的看来,不一致条件在中顶部引发了较大的P290和更偏正向的慢波。

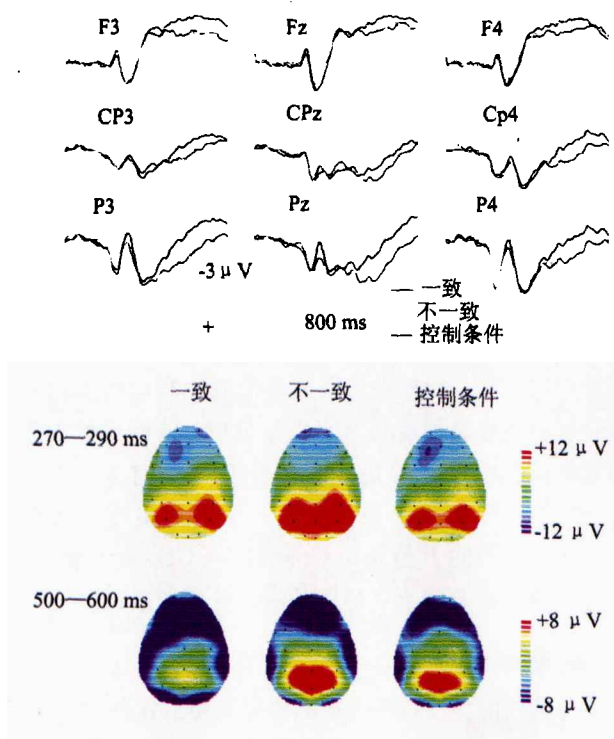


图1 三种刺激类型的ERP总平均图和脑地形图

表1 被试的平均反应时和错误率(括号内为标准差)

	一致条件	不一致条件	控制条件
反应时/ms	676(99.6)	716(104.2)	701(94.5)
错误率 %	12(5.7)	12(5.9)	10(4.6)

2.2.1 P290的平均波幅分析

P290的最大波幅位于P4电极点,首先对该点的峰值进行了ANOVA分析。结果发现,刺激类型的主效应不显著($F=1.578, P>0.1$)。然后在250—350 ms的时间范围内对P290的波幅每隔20 ms取一个时间窗口,计算平均波幅并进行ANOVA分析,统计结果

如表2所示。从表中看出,在290—310 ms的时间窗口内出现了最强的ERP效应,刺激类型的主效应显著($F=3.620, P<0.05$);进一步的分析发现,不一致条件所引起的P290的平均波幅比一致条件($P<0.05$)和控制条件都大($P<0.05$)。刺激类型和电极位置的交互作用不显著,表明不同刺激类型在不同的电极位置上没有显著差异。

表2 时间窗口法对三种刺激类型引起的P290波幅的统计分析结果

效应 时间范 围/ms	刺激类型			刺激类型*电极位置		
	F	P	ϵ	F	P	ϵ
250—270	1.099		0.943	0.544		0.388
270—290	3.303	0.06 (0.045/0.7)	0.833	0.620		0.393
290—310	3.620	0.04 (0.04/0.3)	0.999	0.599		0.298
310—330	0.264		0.951	0.383		0.257
330—350	1.726		0.830	0.287		0.250

* P值对应的空白处表示差异不显著, $P>0.1$;括号内的第一个P值表示不一致条件与一致条件的比较,第二个P值表示不一致条件与控制条件的比较

2.2.2 P290的峰潜伏期分析

对P290峰潜伏期进行重复测量的ANOVA分析。结果发现,刺激类型和电极位置的主效应都不显著,但两者的交互作用显著($F=3.508, P<0.05$)。简单效应分析表明,在CP3电极处,刺激类型的主效应显著($F=5.12, P<0.05$)。进一步分析发现,一致条件(287 ms)和控制条件(286 ms)的P290峰潜伏期都比不一致条件要短(296 ms, $P<0.05$)。但在波幅最大值所在的P4电极点,三种刺激类型间的峰潜伏期差异不显著($F<1, P>0.1$)。

2.2.3 P400—600的平均波幅分析

在P290之后的时间范围内,三种实验条件都引发了分布广泛的P400—600。对P400—600所出现的时间范围每隔100 ms取一个时间窗口计算平均波幅并进行ANOVA分析,统计检验的结果如表3所示。可以看出,最强的ERP效应出现在500—600 ms的时间范围内。头皮前部的电极位置没有发现显著的差异,但是在顶部电极发现了显著的刺激类型之间的差异($F=5.138, P<0.05$)。进一步分析发现,不一致条件和控制条件所引起的ERP的平均波幅比一致条件都

大($P < 0.05$)。在头皮后部和额部电极处,刺激类型和电极位置之间的交互作用都不显著。

表3 时间窗口法对三种刺激类型引的 P600 波幅的统计分析结果

时间范围/ms	效应	前部电极			后部电极		
		F	P	ϵ	F	P	ϵ
400—500	刺激类型	0.556	0.772	1.248			0.924
	刺激类型 * 电极位置	0.491	0.487	0.341			0.437
500—600	刺激类型	1.129	0.699	4.618	(0.023/ 0.018)		0.983
	刺激类型 * 电极位置	0.44	0.538	0.398			0.493

* P 值对应的空白处表示差异不显著, $P > 0.1$; 括号内的第一个 P 值表示一致条件与不一致条件的比较, 第二个 P 值表示一致条件与控制条件的比较

由于 P400—600 的波峰不很明显, 我们没有对它的峰潜伏期进行统计分析。

3 讨论

以小学生为被试者, 本研究得到了显著的 Stroop 效应, 不一致条件下的反应时长于控制条件下的反应时, 控制条件下的反应时又长于一致条件下的反应时, 这说明即使用按键判断而不是命名任务, 被试者的颜色判断反应仍然要受到汉字意义的影响。这与以前用拼音文字为实验材料的很多研究^[1]结果一致, 说明 Stroop 效应具有可重复性和普遍性。

更重要的是, 本研究还发现, 儿童的 Stroop 效应的时程主要体现两个时间窗口内。早期效应表现为刺激出现后 200 ms 左右开始出现的一个正成分, 该成分在 290 ms 左右达到最大值。从脑地形图可以看出, 这个正成分主要分布在头皮后部, 在中—顶部区域波幅最大; 根据它的极性、潜伏期和头皮分布, 它应属于 P300。以往研究表明, P300 的出现常和个体对刺激的识别、评价有关, P300 的波幅可反映对知觉注意资源的依赖程度^[11]; 而 P300 的潜伏期则可反映个体对刺激进行分类的速度而不是反应选择的速度^[12,13]。

根据上面提到的文献, 我们有理由认为, 本实验中观察到的 P300 反映了被试者识别与任务相关的刺激特征的早期知觉注意加工。具体地说, 当儿童注意到汉字意义和书写颜色不一致时, 他们必须把注意力集

中在与任务相关的信息特征上, 并抑制无关刺激(汉字意义)的干扰, 在这种条件下, 被试者需要使用更多的注意资源和付出更大的心理努力, 因而使 P300 波幅增加, 潜伏期延迟。一致条件和控制条件引发的 P300 比较相似, 表明在两种条件下对刺激颜色的识别所需要的注意资源和加工速度没有显著差别。

上述发现对早期有关 Stroop 效应的解释^[4-7]提出了挑战。这种看法认为, Stroop 干扰效应来源于反应选择阶段的竞争, 而不是刺激评价阶段的竞争。本研究的结果显示, 这种竞争可能发生在早期刺激评价阶段。与最近有关成人 Stroop 效应的 ERP 研究^[8-10]相比, 本研究还显示, 儿童对无关信息的抑制比成人发生得稍早一点。这些研究在刺激出现后 500 ms^[8,9]或者 350—400 ms 左右^[10]才发现不一致条件的 ERP 差异, 而本研究在 270—290 ms 左右就发现了信息冲突所导致的 ERP 差异, 说明儿童 Stroop 效应的产生机制可能与成人存在一些差异。

不同实验条件引起的第二个 ERP 效应是 P400—600, 该成分大约在刺激呈现后 400 ms 开始出现, 在头皮顶部是正波, 不一致条件和中性条件的波幅大于一致条件的波幅; 而头皮前部的时程相同的慢波变为负向, 三种条件引起的 P400—600 波幅在前部电极处没有显著差异, 但是从脑地形图上看, 一致条件下引起的慢波在前部分布较广。根据已有研究, 对于慢正波至少有两种不同的看法, 一种观点认为, 它的头皮分布具有左半球优势, 反映了与单词意义加工有关的神经元的活动^[10], 另一种观点认为, 它属于 P300 家族的另一个成员——P-CR, 反映了反应选择的发生时间和难易程度^[7,14,15]。本研究在头皮前部发现的慢波可能与汉字的意义加工有关, 在顶部头皮中线发现的慢正波可能反映了反应选择的难易程度。我们认为, 经过前期的颜色知觉加工和后期头皮前部的汉字意义加工, 在一致条件下, 由于汉字意义和书写颜色激活了同样的概念表征, 儿童能够较快地识别与任务有关的刺激特征, 所以反应选择和准备比较容易, 顶部电极处记录到的慢波的波幅就偏小。而在不一致条件和控制条件下, 儿童需要在汉字意义与汉字颜色间作出选择, 并根据汉字的颜色信息做出正确反应, 这样的头皮顶部区域记录到的慢波波幅就增大。

结论: 本研究选择儿童为被试者, 除了发现反应时的 Stroop 效应外, 还观察到两种 ERP 效应, 一种可能

反映了个体对刺激识别的评价,另一种可能反映了汉字意义的加工和反应选择的难度。综合这些发现我们认为,儿童 Stroop 效应的产生是一个复杂过程,干扰效应是早期刺激颜色识别和后期反应选择两个阶段共同作用的结果,而促进效应则发生在后期的反应选择阶段。

参 考 文 献

- 1 MacLeod C M. Half a century of research on the Stroop effect; an integrative review. *Psychological Bulletin*, 1991; 109: 163—203
- 2 MacLeod C M, MacDonald P A. Interdimensional interference in the Stroop effect; uncovering the cognitive and neural anatomy of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 2000; 4(10): 383—391
- 3 Roelofs A, Hagoort P. Control of language use: cognitive modeling of the hemodynamics of Stroop task performance. *Cognitive Brain Research*, 2002; 15: 85—97
- 4 Duncan-Johnson C C, Kopell B S. The Stroop effect; brain potentials localize the source of interference. *Science*, 1981; 214: 938—940
- 5 Rebai M, Bernard C, Lannou J. The Stroop's test evokes a negative brain potential, the N400. *International Journal of Neuroscience*, 1997; 91: 85—94
- 6 Grapperon J, Vidal F, Leni P. The contribution of cognitive evoked potentials to knowledge of mechanisms on the Stroop test. *Neurophysiologie Clinique*, 1998; 28: 207—220
- 7 Ilan A B, Polich J. P300 and response time from a manual Stroop task. *Clinical Neurophysiology*, 1999; 110: 367—373
- 8 West R. Age-related decline in inhibitory control to the increased Stroop effect observed in older adults. *Psychophysiology*, 2000; 37(2): 179—189
- 9 West R, Alain C. Event-related neural activity associated with the Stroop task. *Cognitive Brain Research*, 1999; 8: 157—164
- 10 Liotti M, Woldorff M G, Perez. III R, Mayberg H S. An ERP study of the temporal course of the Stroop color-word interference effect. *Neuropsychologia*, 2000; 38: 701—711
- 11 Kok A. On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 2001; 38(3): 557—577
- 12 Polich J, Kok A. Cognitive and biological determinants of P300; an integrative review. *Biological Psychology*, 1995; 41: 103—146
- 13 Kok A. Age-related changes in involuntary and voluntary attention as reflected in components of the event-related potential (ERP). *Biological Psychology*, 2000; 54(1—3): 107—143
- 14 Falkenstein M, Hohnsbein J, Hoormann J. Effects of choice complexity on different subcomponents of the late positive complex of the event-related potential. *Electroencephalography Clinical Neurophysiology*, 1994a; 92: 148—160
- 15 Verleger R. On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology*, 1997; 34: 131—156

An ERP Study on Processing Stages of Children's Stroop Effect

PENG Danling, GUO Taomei, WEI Jinghan¹, XIAO lihui

(School of Psychology, Beijing Normal University, Beijing 100875; Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences¹, Beijing 100101)

[Abstract] The temporal course of the Stroop effect was investigated by event related potential(ERP) technique with children of sixth grade. Subjects were asked to identify the display color of the Chinese characters by pressing the corresponding key as quickly and accurately as possible. The brain electric signals were recorded by a 32-channel ERP/EEG system. Besides the behavioural data, the evidence from the ERP data for the Stroop effects was also observed. It is resulted that the first ERP effect was obtained at about 300 ms post stimulus onset. The P300 amplitude induced by inconsistent condition is larger than that in consistent and neutral conditions, while the P300 latency for incongruent trials is the slowest. The second ERP effect generated by colored characters is a slow wave emerging at about 400 ms after the stimulus onset. There were significant trial type differences at posterior sites but not at frontal sites. Further comparisons showed that the mean amplitude for incongruent trials and controls was larger than congruent trials. These findings indicate that Stroop effect in children involves a complex process. The interference effect is the result of assembling the early stimuli evaluation stage and later response selection stage, while the facilitation effect may occur at the later stage for response selection.

[Key words] Stroop effects ERP color identification