

视觉分类的时间过程：事件相关电位提供的电生理证据

陈安涛^① 李红^{①*} 邱江^① 罗跃嘉^{①②③*}

(^① 西南大学心理学院, 认知与人格教育部重点实验室(西南大学), 重庆 400715; ^② 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875; ^③ 中国科学院心理研究所, 北京 100101. * 联系人, E-mail: lihong1@swu.edu.cn; luoyj@bnu.edu.cn)

摘要 视觉分类是来自视觉刺激的传入特征集与源自概念知识的预期特征集之间的相互作用过程, 包括匹配提取加工和冲突抑制加工. 本研究采用事件相关电位(ERP)探索视觉分类的时间过程. 结果表明, 预期特征集越大则 N1 波幅越大, 显示出预期特征集对注意的调节效应; 当预期特征集大于或等于 2 时, 引出了明显的 N2 成分, 显示出预期特征与传入特征不一致时的冲突效应; 类别判断在晚正成分(late positive component, LPC)成分上有明显反映, LPC 对冲突刺激的抑制加工也相当敏感. 分析表明, 视觉分类加工的时间过程如下: 选择性注意、特征知觉、特征匹配/提取、类别判断/冲突抑制, 其中类别判断是分类的核心过程, 但前 3 个子过程构成了分类的基础. 本研究结果支持高水平分类加工主要反映在 LPC 上的结论.

关键词 视觉分类 事件相关电位 预期特征集 传入特征集 冲突抑制 LPC

分类(categorization)是根据特定的标准确认对象身份的过程, 经过分类人们可以将世间万物分门别类地区分开来^[1,2]. 分类是基础性的认知活动, 如果不能将知觉信息区分为不同类别, 那么原始知觉信息实际上是无用的^[3]. 多年来, 不同领域的研究者开展了大量工作, 期望探明分类的心理与神经基础^[4,5].

早期研究认为, 晚正成分(late positive component, LPC)的波幅反映了涉及背景更新的分类加工的程度^[6,7]. Ito 等人^[8]发现 ERP 的 LPC 对被试的外显分类活动敏感. Azizian 等人^[9]研究了分类中目标刺激与标准刺激间的相似性变化在 ERP 上的反映, 发现 P300 波幅可反映相似性在分类中的效应. 而 Thorpe 等人^[5]发现人脑能够非常迅速地对复杂背景下的自然物体做出正确区分: 目标刺激(动物照片)和分心刺激(非动物照片)引起的 ERP 波形在刺激后 150 ms 处出现分离, 非动物图片引起波形在 150 ms 处折向负方向, 而动物图片引起波形则持续正走向直到 180 ms 才折向负方向. Antal 等人^[10]发现非动物图片在 150~250 和 350~500 ms 时间窗口内引出了更负的 N1 和 N2, 而动物图片则在 250~350 ms 时间窗口引出了更正的 P2 成分. 他们认为 N1 与高水平分类加工有关. Fabre-Thorpe 等人^[11]发现, 在对被试进行充分训练之后, 仍然不能提高动物 VS 非动物的自然景物的分类速度, 这意味着视觉分类要经过多个加工阶段, 并且这些阶段不能被压缩.

可见, 分类的 ERP 研究得到了两种不同的结论: 一种结论认为, 分类在 LPC 或 P300 上得到反映; 另一种结论认为, 分类在早期成分 N1 上即得到了反映. 之所以出现如此不同的结论, 原因在于已有研究对分类的认知加工过程没有清晰的理解. 显然, 分类是传入特征集与预期特征集的相互作用过程, 这一过程包含 3 种情况: 在对应维度上传入特征与预期特征一致, 则提取该特征; 传入特征与对应维度上预期特征不一致, 则抑制该特征; 传入特征在预期特征集中没有对应特征, 则忽视该特征.

以 Thorpe 等人^[5]的研究为例, 在对“动物”和“非动物”照片进行分类反应时, 个体关于“动物”的概念能够为分类活动提供自上而下的判断依据, 形成预期特征集(如四肢、眼睛、翅膀、毛发等); 而客体本身所具有的特征通过视觉加工以自下而上的方式传入, 构成传入特征集(如红色羽毛、长嘴等). 如果传入的刺激特征中有任何一个落入预期特征集, 那么即可做出“正确的”反应.

认为 ERP 早成分反映了分类加工的研究大都是以 Thorpe 等人^[5]的范式开展的. 在该研究范式下, 根据概念“动物”、“非动物”形成的预期特征集非常大. 当传入特征集来自具体动物时, 这些传入特征几乎都可以落入预期特征集, 而不会引起特征冲突. 实际上, 视觉刺激呈现后 150 ms 时大脑仅能进行初步的知觉加工^[12]. 因此, 在这类研究中发现的 ERP 波形

分离可能只反映了大脑对个别特征的知觉,而没有能够反映更高水平(包含冲突-抑制过程)的分类加工。但是包含冲突-抑制的分类对人类适应行为来说是有价值也是更普遍的认知活动,毕竟动物-非动物的粗略分类对于认识复杂的世界来说是远远不够的。

如前述及,分类是建立在预期特征集和传入特征集二者的相互作用上的,这就需要对刺激的特征灵活地加以操纵,标准几何图形能够达到这样的效果,而且这类材料还能够控制经验和背景因素^[13]。在本研究中,先通过一个归纳任务^[14]让被试比较两个几何图形,找出其中的共同特征(形成预期特征集);然后以此预期特征集为标准,判断第3个几何图形(由该图形得到传入特征集)与前两个几何图形是否为同一类。分类标准是,传入特征集中有且只有一个特征在对应维度上与预期特征集匹配(匹配特征为1),则做出肯定判断,传入特征集中没有任何特征在对应维度上与预期特征集匹配,则做出否定判断。

传入特征集与预期特征集之间将出现3种相互作用:传入特征落入预期特征集,且与对应维度特征匹配(引起匹配提取加工);传入特征落入预期特征集,但与对应维度特征冲突(引起冲突抑制加工);传入特征没有落入预期特征集而与任务无关(引起无关忽视加工)。设计3种条件:预期特征集有1个特征(one matching feature, 1MF);预期特征集有2个特征(two matching features, 2MF);预期特征集有3个特征(three matching features, 3MF)。通过新的实验设计,希望记录并讨论包含冲突控制的高水平视觉分类的脑电动态变化过程。

1 实验方法

(i) 被试。15名在校大学生作为有偿被试,7名男性,8名女性,年龄范围在21~28岁,平均为24岁,所有被试身心健康,右利手,视力正常或矫正后正常,均签署了实验知情同意书。

(ii) 刺激材料。刺激材料均是规则的几何图形,包括三角形、正方形、圆形和十字形(图1)。全部材料由CorelDRAW11绘制,将每个图片以bmp格式文件单独导出。图片大小为:三角形(底4.56 cm,高5.92 cm)、正方形(边长4.28 cm)、圆形(直径4.28 cm)、十字形(边长4.24 cm)(材料高度和宽度均不超过5 cm,被试双眼与屏幕距离为1~1.2 m,因此水平与垂直视角均小于3.5°)。

每个图片可能在形状(S)、颜色(C, RGB色彩模式)和条纹方向(O)3个维度上变化,每种维度变化都是4,由此构成 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 张相互不同的图片,图片背景均为黑色。S:三角形、圆形、正方形、十字形。C:黄色(RGB: 255, 235, 0)、蓝色(RGB: 0, 221, 255)、绿色(RGB: 0, 255, 50)、红色(RGB: 255, 51, 0)。O:水平、竖直、45°及135°。

(iii) ERP记录。实验仪器为NeuroScan脑电记录系统,参考电极置于双侧乳突连线,前额接地,采用64导电极帽记录脑电,同时记录水平眼电和垂直眼电,滤波带通为DC~100 Hz,采样频率为500 Hz/导,头皮电阻降至5 kΩ以下。进行离线分析(off-line analysis),分析时程(epoch)为700 ms,含基线100 ms,自动矫正眨眼等伪迹,波幅大于 $\pm 80 \mu\text{V}$ 者在叠加中被自动剔除。

(iv) 程序和任务。首先,出现小十字,持续500 ms;其次,同时出现刺激1(S1)和刺激2(S2),持续1500 ms,让被试归纳二者间的共同特征,形成一个新类别C;最后,呈现刺激3(S3),被试根据刚才得到的类别规则判断S3是否属于新类别C(分类反应),S3呈现随被试按键终止。

C是以特征来界定的,有3种情况(图1):(1)C只由1个特征来界定,如“条纹为横线”的所有图形,S3符合该特征则做肯定反应(图1(a)),否则做否定反应;(2)C由2个特征来界定,如“形状为正方形、条纹为

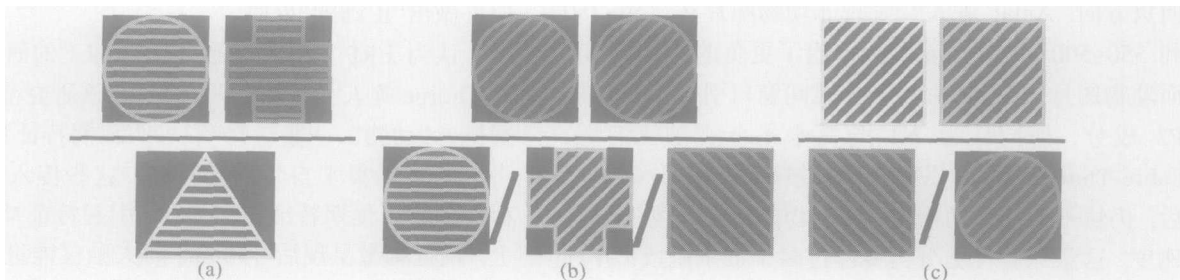


图1 刺激材料、实验任务及其答案示例(这里仅示意了方向和形状)

45°”的所有图形, S3 符合其中一点即做肯定反应(图 1(c)), 否则做否定反应; (3) C 由 2 个特征下界定, 如“形状为圆形、颜色为红色、条纹为 45°”的所有图形, S3 符合其中一点即做肯定反应(图 1(b)), 否则做否定反应. 这样构成了 3 种分类任务, 即 1MF(1 个匹配提取、2 个无关忽视)、2MF(1 个匹配提取、1 个冲突抑制和 1 个无关忽视)和 3MF(1 个匹配提取、2 个冲突抑制).

只有在练习时正确率达到 90%以上者才进入正式实验(15 个被试均达到了这一要求). 由于 S3 出现后被试才开始进行分类加工, 因此 ERP 分析时程从 S3 出现后开始.

(v) ERP 数据分析和统计. 对 1MF, 2MF 和 3MF 条件引发的脑电分别进行叠加和平均. 选择以下 22 个电极位置记录的 ERP 波形用于统计分析: F3, Fz, F4, Fc3, Fcz, Fc4, C3, Cz, C4, Fc5, Fc6, C5, C6(前部 13 个电极点); Cp3, Cpz, Cp4, P3, Pz, P4, Po3, Po4, Poz(后部 9 个电极点). 主要测量并分析 N1, P2, N2 和 LPC. 对 N1 分前部 N100 (80~120 ms)和后部 N140 (120~160 ms)分别测量其波幅(基线到波峰); 对 P2 在 190~250 ms 时间窗口内测量其波幅(基线到波峰); 对 N2 在 250~310 ms 时间窗口内测量其波幅(基线到波峰); 对 LPC 则在 330~450 ms 时间窗口内测量其平均波幅.

用二因素重复测量 ANOVAs 对早期成分(N1, P2 和 N2)的波幅以及晚期成分(LPC)的平均波幅进行分析. ANOVA 因素为条件(三水平: 1MF, 2MF 和 3MF), 电极位置(前部 N1 为 13 个电极点, 后部 N1 为 9 个电极点, P2 和 N2 以及 LPC 为 22 个电极点). 采用 Greenhouse-Geisser 法矫正 P 值.

2 实验结果

2.1 行为数据

被试在 1MF, 2MF 和 3MF 条件下分类反应的平均正确率分别是: 98.08%, 96.63%和 95.65%. 根据信号检测论, 每个被试的 $P(A)$ 值($P(A)=(击中数+正确否定数)/刺激总数$)大于 0.5 则表示其反应是可信的, 分析结果显示全部 15 个被试的反应皆是可信的. 反应时间的方差分析显示, 条件主效应极显著($F(2,28) = 43.129, P < 0.001$); 反应方式(是或否)主效应显著($F(1,14) = 14.721, P = 0.002$), 条件与反应方式交互效应不显著($F(2,28) = 3.511, P > 0.05$).

显然, 做出肯定反应需要进行匹配提取、冲突抑制和无关忽视的加工, 而做出否定反应则不包括匹配提取加工. 由于匹配提取是分类中的关键加工, 所以只有肯定反应下的加工是完全意义上的分类活动, 本研究仅对做出正确的肯定反应的结果做分析. 在肯定反应方式下, 1MF, 2MF 和 3MF 的平均反应时间分别为 651, 818 和 844 ms, 条件主效应极显著($F(2,28) = 82.29, P < 0.001$); 均值多重比较显示, 1MF 极显著地快于 2MF ($F(1,14) = 129.68, P < 0.001$), 1MF 极显著地快于 3MF ($F(1,14) = 82.761, P < 0.001$), 2MF 显著快于 3MF ($F(1,14) = 6.609, P = 0.022$).

2.2 ERP 成分

前部 N1 (N100), 条件主效应显著($F(2,28) = 3.575, P = 0.047$), 电极主效应极显著($F(12,168) = 4.947, P = 0.003$), 条件与电极交互效应不显著($F(24,336) = 0.904, P = 0.105$); 条件多重比较显示, 1MF 和 2MF 差异不显著($F(1,14) = 1.728, P = 0.210$), 2MF 和 3MF 差异不显著($F(1,14) = 1.644, P = 0.221$), 1MF 和 3MF 差异显著($F(1,14) = 8.371, P = 0.012$). 后部 N1 (N140), 条件主效不显著($F(2,28) = 0.493, P = 0.540$), 电极主效应极显著($F(8,112) = 7.547, P = 0.003$), 条件和电极交互效应不显著($F(16,224) = 1.554, P = 0.218$).

P2 成分, 条件主效应显著($F(2,28) = 4.213, P = 0.036$), 电极主效应不显著($F(21,294) = 1.046, P = 0.357$), 条件与电极交互效应显著($F(42,588) = 2.447, P = 0.046$); 条件多重比较显示, 1MF 与 2MF 存在显著差异($F(1,14) = 7.622, P = 0.015$), 1MF 与 3MF 存在极显著差异($F(1,14) = 9.442, P = 0.008$), 2MF 与 3MF 没有显著差异($F(1,14) = 0.001, P = 0.975$).

N2 成分, 条件主效应极显著($F(2,28) = 15.636, P < 0.001$), 电极主效应显著($F(21,294) = 6.202, P = 0.01$), 条件与电极交互效应极显著($F(42,588) = 4.647, P = 0.001$); 条件多重比较显示, 1MF 与 2MF 差异极显著($F(1,14) = 12.051, P = 0.004$), 1MF 与 3MF 差异极显著($F(1,14) = 45.820, P < 0.001$), 2MF 与 3MF 差异不显著($F(1,14) = 2.133, P = 0.166$).

对 LPC 的方差分析结果显示, 条件主效应极显著($F(2,28) = 38.508, P < 0.001$), 电极主效应极显著($F(21,294) = 8.016, P = 0.001$), 条件与电极交互效应显著($F(42,588) = 2.731, P = 0.47$); 条件多重比较显示, 1MF 与 2MF 差异极显著($F(1,14) = 43.303, P <$

0.001), 1MF与3MF差异极显著($F(1,14) = 96.992, P < 0.001$), 2MF与3MF差异不显著($F(1,14) = 0.674, P = 0.425$).

3 讨论

反应时间的行为数据显示, 1MF显著快于2MF, 2MF又显著快于3MF. 如前所述, 1MF包含1个匹配提取和2个无关忽视; 2MF包含1个匹配提取、1个冲突抑制和1个无关忽视; 3MF则包含1个匹配提取加工和2个冲突抑制加工. 3个条件涉及的加工过程数量是相同的, 并且都包含1个匹配提取, 因此它们之间的差异在冲突抑制和无关忽视上. 这一结果说明冲突抑制较之无关忽视更困难, 提示冲突抑制可能发生更复杂的思维阶段, 而无关忽视可能发生在较简单的阶段(比如注意).

在100 ms时, 3个条件都在中前部引起了明显的N1波, 而且3个条件引起的波幅在负方向上呈现出有规律的下降关系: 3MF引起的波幅最高, 2MF其次, 1MF最低. 根据多数ERP研究结果, N1成分与注意有关^[15]. 当被试的工作记忆中保持着3个可能选择的时候, 被试需要注意的特征数量是3个; 而当保持着2个可能选择时, 需要注意的特征数量就2个; 当只保持1个特征时, 所需要注意的特征只有1个. 这样来看, N1波在负方向上的波幅很好地反映了被试在任务中需要注意的特征数量, 即所需要注意的特征数量越多波幅就越大.

从150 ms开始, 1MF条件下的波形与另两个条件下的波形开始出现差异. 到约220 ms三个条件下的波形均达到一个峰值(P2成分), 1MF的P2波幅较之另两个条件更大, 而2MF和3MF之间没有明显差异. 根据有关研究^[5], 在150 ms时出现的1MF与2MF及3MF波形的分离是特征知觉的开始, 到220 ms出现P2时特征知觉结束. 1MF下更大的P2波幅显示, 在此条件下引起的知觉匹配更强; 而2MF和3MF下的P2波幅较小, 显示在这两个条件下特征觉察更分散, 这是因为目标特征数量不止一个, 知觉匹配更分散, 强度因而较低. P2具有显著的条件与电极没有差异, 这说明知觉加工主要与中前部脑区有关^[13].

N2波与心理冲突密切相关^[16,17]. 在本研究中, 2MF和3MF均引出了较明显的N2波. 但1MF在此刻几乎无成分出现, 这提示2MF和3MF引起了较强烈的心理冲突. N2具有显著的条件与电极交互效应,

结合图2的波形分析, 可知中前部各点在N2上存在更多差异, 而顶枕部各点在N2上则差异较小, 这可能与N2反映冲突觉察有关, 因为冲突觉察一般与前扣带回激活有关^[17]. 分析可知, 3MF在2个维度上出现冲突抑制, 2MF只在1个维度上出现冲突抑制, 而1MF则根本没有冲突抑制. 显然, 冲突抑制过程的存在会造成心理冲突, 而这种过程越多造成的心理冲突越大. 3个条件在N2上的波幅很好地反映了这一点: 1MF没有引起明显的N2; 3MF和2MF都引出了明显的N2, 3MF引起的N2还略高于2MF, 这是因为3MF在2个维度上出现冲突抑制, 而2MF则只在1个维度上出现冲突抑制.

在N2成分之后, 约370 ms处, 1MF引出了相当明显的LPC成分, 而2MF和3MF的LPC则不明显(图2). 这种关系可解释为, 经过知觉觉察和知觉冲突之后, 大脑开始在思维水平上有意识地对冲突的特征加以抑制. 一般认为LPC反映着复杂且高级的心理加工. Donchin等人^[6]认为, LPC的潜伏期代表着对刺激的评价和分类所需要的时间. 结合本研究任务性质分析, 可知LPC代表着分类加工的完成, 这里所谓的分类加工是在知觉分析基础上发生的带有决策色彩的判断.

另外, 有研究者认为LPC成分代表着某种刺激加工的抑制^[18]. 本研究中1MF不包含抑制加工, 而2MF和3MF都包含了抑制加工, 这在波幅上有清楚的反映: 1MF引起的波幅显著大于2MF和3MF. 不过, 2MF与3MF引起的P3波幅没有显著差异, 这一结果可能与思维的平行加工有关^[19], 但还需要开展进一步研究加以讨论.

根据本研究结果, 可描述分类加工的时间过程(图3). 根据预期特征集, 被试将形成两个准备: 维度准备和特征准备. 维度准备表现在注意加工上: 注意目标维度(如颜色、形状)而不注意无关维度(如方向). 在刺激出现后约100 ms, 只有目标维度受到注意(以实线表示), 而无关维度被忽视(方向, 以虚线表示), 即目标维度得到进一步加工, 注意的加工在波形上表现为N1. 进一步加工即为知觉分析加工, 其加工结果是识别出目标维度上的具体特征是什么(红色、圆形), 知觉分析的加工在波形上表现为P2.

之后分类加工进入特征匹配阶段, 此时表现出特征准备的作用. 将知觉分析得到的传入特征与预期特征加以比较, 如果二者相同, 则受到提取并进

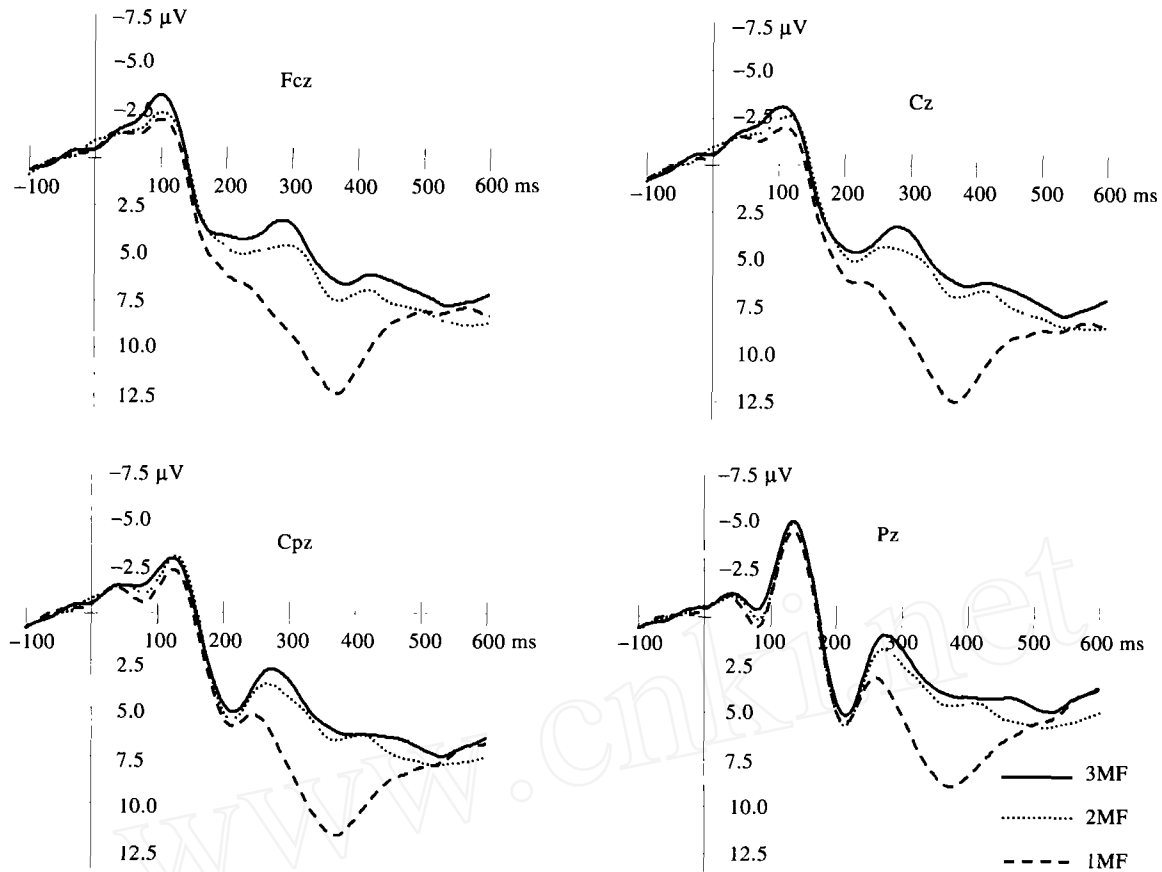


图 2 3 种条件在肯定分类方式上的总平均图
电极点: Fcz, Cz, Cpz, Pz

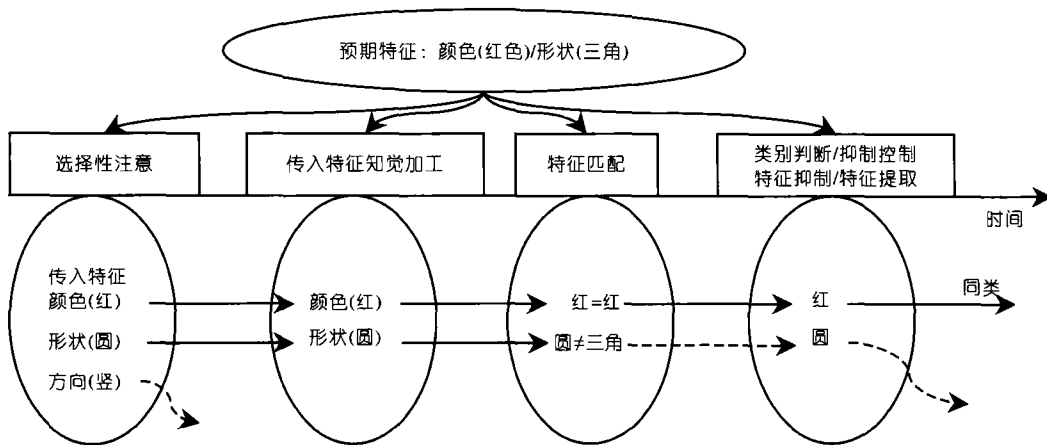


图 3 视觉分类的时间过程(以 2MF 条件为例)

入下一阶段加工; 如果二者不同, 则出现冲突, 如果出现冲突, 将在波形上引出 N2. 在知觉分析结束之后, 即进入类别判断阶段. 在此阶段, 被试将进一步

对冲突的特征加以抑制, 并根据匹配的特征做出“正确反应”的判断, 类别判断的波形表现为 LPC. 而对冲突特征的抑制将导致 LPC 波幅变小. 值得注意的

是,在特征进入思维阶段,即使出现冲突,大脑也不能容易地消除特征的印象,因此对冲突特征的抑制将持续一段时间,这可能是2MF和3MF引起的LPC波幅明显小于1MF的原因。

致谢 本工作受国家自然科学基金(批准号:30370488)、西南大学基础心理学国家级重点学科(批准号:XGZ04006)和教育部重点项目资助。

参 考 文 献

- 1 Zentall T R, Galizio M, Critchfield T S. Categorization, concept learning, and behavior Analysis: An introduction. *J Exp Anal Behav*, 2002, 78(3): 237—248
- 2 买晓琴, 罗跃嘉. 自然物体分类的 ERP 研究. *心理科学进展*, 2004, 12(2): 168—175
- 3 Freedman D J, Riesenhuber M, Poggio T, et al. Categorical representation of visual stimuli in the primate prefrontal cortex. *Science*, 2001, 291(5502): 312—316
- 4 Anderson J R. The adaptive nature of human categorization. *Psychol Rev*, 1991, 98(3): 409—429
- 5 Thorpe S, Fize D, Marlot C. Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 1996, 381(6582): 520—522
- 6 Donchin E. Surprise! ... Surprise? *Psychophysiology*, 1981, 18(5): 493—513
- 7 Donchin E, Coles M G H. Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behav Brain Sci*, 1988, 11(3): 357—374
- 8 Ito T A, Cacioppo J T. Electrophysiological evidence of implicit and explicit categorization processes. *J Exp Social Psychol*, 2000, 36(6): 660—676.
- 9 Azizian A, Freitas A, Watson T D, et al. Electrophysiological correlates of categorization: P300 amplitude as index of target similarity. *Biol Psychol*, 2006, 71(3): 278—88
- 10 Antal A, Keri S, Kovacs G, et al. Early and late components of visual categorization: An event-related potential study. *Cogn Brain Res*, 2000, 9(1): 117—119
- 11 Fabre-Thorpe M, Delorme A, Marlot C, et al. A limit to the speed of processing in ultra-rapid visual categorization of novel natural scenes. *J Cogn Neurosci*, 2001, 13(2): 171—180
- 12 Hillyard inrd S A, Anllo-Vento L. Event-related brain potentials in the study of visual selection attention. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1998, 95(3): 781—787
- 13 Bigman Z, Pratt H. Time course and nature of stimulus evaluation in categorization as revealed by visual event-related potentials. *Biol Psychol*, 2004, 66(2): 99—127
- 14 Chen A, Li H, Feng T, et al. The diversity effect of inductive reasoning under segment manipulation of complex cognition. *Sci China Ser C-Life Sci*, 2005, 48(6): 658—668
- 15 Mangun G R. Neural mechanisms of visual selective attention. *Psychophysiology*, 1995, 32(1): 4—18
- 16 Wang Y, Kong J, Tang X, et al. Event-related potential N270 is elicited by mental conflict processing in human brain. *Neurosci Lett*, 2000, 293(1): 17—20
- 17 van Veen V, Carter C S. The timing of action monitoring processes in anterior cingulate cortex. *J Cogn Neurosci*, 2002, 14(4): 593—602
- 18 Goldstein A, Spencer K M, Donchin E. The influence of stimulus deviance and novelty on the P300 and Novelty P3. *Psychophysiology*, 2002, 39(6): 781—790
- 19 Rousset G A, Fabre-Thorpe M, Thorpe S. Parallel processing in high-level categorization of natural images. *Nat Neurosci*, 2002, 5(7): 629—630

(2005-11-24 收稿, 2006-04-29 接受)