

What is the biological basis of consciousness?

意识与多感觉信息整合的最新研究进展

刘睿^{①②}, 王莉^{①*}, 蒋毅^①

① 中国科学院心理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 脑科学与智能技术卓越创新中心, 北京 100101;

② 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: wangli@psych.ac.cn

2015-06-17 收稿, 2015-09-21 修回, 2015-09-21 接受, 2015-11-03 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDB02010003)、国家自然科学基金(31070903, 31200767)和中国科学院青年创新促进会(2014073)资助

摘要 长期以来科学界一直认为意识对多感觉信息整合来说是必需的。然而, 近年来有研究者通过操纵视觉刺激知觉意识的方法(视觉掩蔽、双眼竞争、连续闪烁抑制)发现多感觉信息整合即使在视觉信息处于无意识条件下也能发生。最新的一项研究首次表明不同感觉通道(视觉和听觉)信息甚至在同时处于阈限水平下时仍然能得到一定程度的整合, 进一步提供了关于无意识多感觉信息整合的证据。这些研究挑战了以往关于多感觉整合需要意识的主张, 但其应用具有一定的局限性, 并不能完全否认意识在多感觉整合中的作用。本文首先回顾了意识与信息整合关系的传统观点, 接着对近年来无意识多感觉信息整合的研究进行综述并讨论了无意识多感觉整合的加工水平、时间界限、机制解释等问题, 最后对未来的研究方向进行展望, 以期增加人们对意识与整合关系的新认识, 为多感觉信息整合的后续研究提供借鉴。

关键词 多感觉整合, 意识, 无意识, 跨通道信息加工, 视觉

无论是春夏之交莺歌燕舞, 还是中秋月下丹桂飘香, 通常人们所遇到的事物和情境都同时传递着多种形式的物理和化学信号(如光波、声波、气味分子等), 这些信号分别被不同的感觉器官所接收。尽管如此, 人们并没有把这些事件知觉为支离破碎的各种颜色、声音和气味等信息, 而是将来自不同感觉通道的信息(如视觉、听觉和嗅觉等)整合成一个统一、连贯、稳定的单一多感觉事件, 这种多感觉事件的加工过程即为多感觉整合(multisensory integration)^[1-3]。多感觉整合能弥补单一模态信息的匮乏, 有助于人们更有效地感知环境中具有意义的信息, 从而对于人类的学习、记忆以及意识的形成都有非常重要的作用。多感觉整合被认为是研究意识和脑高级活动的重要内容, 也是行为和神经科学研究最热点的前沿领域之一。

在多感觉整合的研究中, 一个核心的问题是, 多感觉通道的信息整合是否需要意识。对于这个问题的解答与意识研究者们关注的一个焦点(即整合和意识的关系)有关。早期有关意识与整合关系的研究与理论揭示了意识在信息整合包括多感觉信息整合中的必要性^[4-6]。随着无意识实验范式尤其是视觉无意识实验范式的发展与革新, 研究者们可以通过多种手段制造无意识状态, 包括操纵刺激本身的知觉条件(如掩蔽、连续闪烁抑制等)以及控制被试的注意分配方式(如注意瞬脱、不注意视盲等)^[7]。这都为研究者们对多感觉整合是否可以在没有意识参与的条件发生这一问题进行深入探索提供了可能。随着研究的深入, 当前研究者们又面临着更精细和具体的问题, 例如, 无意识多感觉信息整合究竟发生在感觉水平还是语义水平上, 这一整合过程的时间界限何

引用格式: 刘睿, 王莉, 蒋毅. 意识与多感觉信息整合的最新研究进展. 科学通报, 2016, 61: 2-11

Liu R, Wang L, Jiang Y. Recent progress in the study of consciousness and multisensory integration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2-11, doi: 10.1360/N972015-00666

在等问题. 本文将回顾有关意识与多感觉信息整合关系的经典理论与相关研究, 尤其关注使用改变刺激知觉条件范式的无意识多感觉信息研究并对无意识多感觉信息整合的加工水平、时间界限和解释机制进行讨论, 以期增加人们对多感觉整合的新认识, 为后续研究意识这个“千古之谜”提供借鉴.

1 意识与信息整合关系的传统观点

意识的绝大多数理论假定整合和意识紧密相关, 整合问题是意识研究的重点, 而意识又在信息整合中具有中心的作用^[8-10]. 对于这种潜在密切联系的描述至少可以追溯到笛卡尔、康德以及詹姆斯的论著^[11-13]. 这种将意识与信息整合紧密联系在一起的传统观点对当今学术思想有着很深远的影响. 全局神经工作空间理论(global neural workspace theory, GNW)为整合和意识的紧密关系提供了神经基础的假设, 它认为有意识的加工涉及远程反馈连接, 从而能够使不同种类的信息在大脑中发生整合, 而无意识情况下的加工则处于信息封闭的状态, 不存在不同脑区间的信息交换^[14,15]. Tononi研究组^[4-6]提出的整合信息理论(integrated information theory, IIT)认为人以整合信息的方式来获得意识, 或者说意识就是一个系统所能整合的信息, 并可以通过信息论的方法加以计算. 近年来TMS结合EEG实验中发现, 失去和恢复意识与大脑整合信息的能力有关. 在意识清醒状态下, 向被试的前运动区(the premotor area)施加TMS刺激同时记录全脑的EEG活动, 研究者观察到脑电波由刺激位点向相邻区域“扩散”. 然而, 若被试处于非快速眼动睡眠状态, 即使向相同位点施加强度更高的TMS刺激也无法观察到前述现象^[16]. 后续研究中, 研究者还以类似方法(向局部或整个大脑进行轻微刺激), 对不同意识状态下(如全身麻醉、昏迷等)大脑复杂性反应进行考察, 并发现随着意识程度的减弱脑内有效连接数量、PCI值(perturbational complexity index)均随之降低^[17-19], 研究者推测这与丘脑皮层模块的信息整合能力丧失有关^[9,20]. 随着无意识研究的深入, Tononi研究组^[20,21]近来也在其信息整合理论框架下加入了无意识的成分, 但他们并不认为这些无意识的“僵尸”系统具有信息整合的功能, 虽然从行为上看它们似乎具有某些计算功能, 但在这样的前馈系统信息的输入完全来自于外部输入, 其输出只影响下游信息的传递而对整个系统其他部

分并无影响, 换句话说, 没有反馈即没有整合, 因此单纯的前馈系统也不具备意识.

2 无意识条件下的多感觉信息整合

2.1 单一通道无意识的研究

视觉是人类感知世界最主要的信息来源, 研究者们对视觉系统的认识也较之其他感觉通道来说更为深入. 在意识的研究领域中, 视觉系统也被作为研究意识的突破口. 与其他通道的意识(如听觉意识、触觉意识等)相比, 视觉意识在定义的操作性和实验的可行性以及实验结果的适用性等方面具有独特的优势. 早期研究认为视觉是优势感觉通道, 从而不受其他感觉通道影响. 随后的一些研究表明其他通道的信息能够调节视知觉, 甚至当视觉刺激处于无意识的状态下, 该影响效果仍然存在^[22]. 前人利用多种范式(如掩蔽、连续闪烁抑制等)来考察被试的视觉无意识加工与其他感觉通道信息加工的整合及交互作用, 而探讨除视觉外的其他感觉通道之间的无意识整合的文献则相对较少.

视觉掩蔽(visual masking)技术是一种被广泛用来研究无意识多感觉信息整合的方法. 一般来说, 该方法是通过缩短目标刺激的呈现时间(通常小于50 ms), 并呈现时间和空间上与之相近的掩蔽刺激, 以达到使目标刺激不被观察者所觉知的目的^[23,24]. 在跨通道信息整合的研究中, 研究者在掩蔽视觉刺激呈现的同时或短时间内再给予另一感觉通道的信息, 这样即可观测该感觉通道信息与无意识视觉信息的整合及交互作用. Ngo和Spence^[25]分别采用听觉、触觉以及听觉触觉同时呈现等多种方式来研究跨通道信息对处于后摄掩蔽(backward masking)条件下的视觉目标刺激加工的影响. 实验的每个试次由先后呈现的4对被掩蔽-掩蔽刺激组成, 其中掩蔽刺激是由16个点组成的4×4矩阵, 被掩蔽刺激则是由出现在4×4矩阵的任意位置上的4个点组成, 这4个点可能组成不规则的形状(分心物), 也可能组成菱形(目标物). 目标物总是出现在第三对刺激中, 其余的3对刺激包含的都是分心物. 每个被掩蔽刺激(4个点)呈现100 ms, 随后紧接着呈现掩蔽刺激(16个点)100 ms. 在听觉条件中, 声音刺激与被掩蔽刺激同时呈现, 与4组被掩蔽刺激相对应的是4个纯音信号, 可能出现的序列有4个声音全是低音(LLLL)或第三个声音是高音

其余3个声音为低音(LLHL),也就是说和目标物对应的声音刺激有可能是低音也有可能是高音.在触觉条件中,与被掩蔽刺激同时呈现的是高频或低频震动,也是包括LLLL或LLHL 2种刺激序列.在听触混合条件中,声音刺激和触觉震动都随着被掩蔽刺激同时呈现,并且两者呈现的序列一致(LLLL或LLHL).在每个条件中被试的任务均是探测目标物所在的位置(左上角、右上角、左下角或者右下角).结果发现,高频的听觉刺激、触觉震动以及听触混合刺激与相应形式的低频刺激相比都能够促进被试对处于掩蔽条件下的视觉目标物的检测.这一研究说明某感觉通道的信息可以促进另一感觉通道的信息从无意识状态进入意识状态,提供了多感觉整合能够在无意识条件下发生的证据.视觉掩蔽条件下的多感觉信息整合现象并不局限于简单视觉刺激(如菱形、字母等)^[25,26],也表现于复杂有意义的视觉刺激(如动物简笔画).Chen和Spence^[27]选用简笔画(如狗)作为视觉目标刺激,以随机曲线组成的图形作为视觉掩蔽刺激,听觉刺激是与视觉目标刺激一致(如狗叫声)、不一致(如工具声)的自然声音或白噪音.实验结果显示,一致性的声音能够促进掩蔽条件下视觉目标图画的识别.

除了视觉掩蔽技术,双眼竞争也是研究者探索无意识多感觉整合的重要实验范式.视觉实验中当同时给被试双眼呈现不同的刺激时,被试感知到的不是2种刺激的叠加而是2种刺激交替出现,这就是经典的双眼竞争(binocular rivalry)范式^[28,29].在双眼的输入刺激动态竞争的过程中,外界的输入刺激始终保持不变,但被试有意识的主观觉知却不断发生变化,当被试感知到其中一个刺激(主导状态)时,另一个刺激则不被被试感知到(抑制状态).Zhou等人^[30]用双眼竞争范式来研究嗅觉对视觉加工的调制作用.他们通过立体镜向被试的双眼分别呈现亮度匹配的玫瑰花和记号笔灰度图片,同时给被试闻玫瑰花或记号笔的气味,结果发现了图片与气味的一致性效应,即当呈现玫瑰(或记号笔)气味时,玫瑰(或记号笔)图片的主导时间会显著提高.视听整合方面,Chen等人^[31]研究发现双眼竞争中被试的视觉受到同时呈现的听觉信息的调制.他们用红蓝眼镜呈现鸟-汽车图形,同时加以鸟叫声、汽车声或无关的声音刺激,结果发现与呈现无关声音刺激相比,和呈现的鸟叫声或汽车声不一致的图形在双眼竞争中占主导的

时间更少.

视觉掩蔽范式虽然应用广泛,但存在一些不足,例如,由于目标刺激呈现时间短且掩蔽刺激需要在时空上与之相接近,从而难以提供持续较长时间的不可见刺激^[7,32].作为双眼竞争范式的一种变式,连续闪烁抑制范式(continuous flash suppression, CFS)能够控制视觉刺激处于不可见的状态长达数分钟的时间,从而弥补了上述视觉掩蔽范式的不足.连续闪烁抑制范式是通过在非优势眼呈现低对比度的目标刺激,在优势眼呈现快速变化和高对比度的掩蔽刺激,来达到抑制目标刺激的目的^[33~36].Lupyan和Ward^[37]曾采用CFS范式考察听觉词汇是否能促进无意识图片的加工,结果发现如果声音与图片内容一致,被试反应的击中率则会显著提高,且虚报率在各条件间没有显著差异.有研究者利用CFS范式与线索提示范式相结合的方法考察了意识在视听言语整合中的作用^[38].实验中呈现2个被动态变化噪音所抑制的唇部运动序列,同时呈现与其中一个序列相一致的言语声音刺激,随后一个视觉目标物呈现在之前其中一个唇部运动序列所在的位置,视觉目标物出现在视听一致的位置的概率为80%.结果发现当视觉目标物出现在视听一致的位置时被试对它的识别要显著快于当其出现在视听不一致的位置时,表明被试能够在意识不到唇部运动序列的情况下将其与意识上的声音刺激相整合,并进一步利用学到的目标物呈现位置与跨通道线索一致性之间的关系来指引他们的注意.研究者进一步研究了意识在McGurk跨通道整合效应中的作用.McGurk效应指的是一种视觉改变语音感知的跨通道现象,如在发出“ba”这个声音的同时伴随“ma”的唇部运动,被试听到的声音变成了“na”.当在实验中通过CFS范式使视觉唇部运动处于不可见的状态时,这种在意识上观察到的McGurk效应则消失.综合上述结果,多感觉信息整合是否需要意识取决于所整合的信息的类型.

另一方面,研究者们也对CFS范式进行不断改进,例如Jiang等人^[39]提出一个CFS的变式:突破连续闪烁抑制(breaking continuous flash suppression, b-CFS)范式,具体操作如下,给被试的其中一只眼呈现一系列对比度由弱变强的目标刺激,另一只眼呈现动态噪音点,并要求被试看到目标刺激就按键反应,由此得到的反应时即抑制时间(suppression time)能够反映刺激在无意识下加工的深度.Alsus和

Munhall^[40]采用b-CFS范式对言语的无意识视听整合进行了研究,他们将听觉句子和与该听觉刺激相一致或不一致的说话嘴型的录影片段同时呈现;录影片段的对比度由弱变强,动态噪音点的对比度由强变弱;整段视听刺激时长6 s,被试需要在看到录影片段时就立即按键.被试的反应时在视听一致条件下显著短于视听不一致的条件,即在视听一致时视觉刺激能够更快地突破抑制.另外,为了排除观察到的一致性效应是来自于意识上的反应偏向,他们设计向两只眼睛呈现同样的混合在一起的视觉材料和动态噪音,在该控制条件下没有发现一致性效应.

2.2 完全无意识的研究

上述视听整合的研究,包括其他感觉通道信息整合的研究^[41,42],都从某种程度上考察了无意识条件下多感觉信息整合的可能性.但是被试在这些研究中总是能够意识到其中某个通道的刺激,所以很有可能是通过对这个通道的刺激的有意识知觉才能实现它与另一个通道的处于无意识水平的刺激的整合.整体通路假设(global access hypothesis)^[43]可以解释该现象:意识上呈现的刺激信息传递到各个模块,包括无意识视觉刺激所激活的模块,从而使得该有意识的刺激能够与无意识的刺激相比较.因此,先前的这些研究并没有提供关于多感觉信息能够在完全无意识条件下整合的证据,只有当不同感觉通道信息都处于无意识水平时才能真正地探究无意识多感觉整合问题.

最近,一项研究发现被试在深度睡眠的情况下能够学习到气味与音调之间的联结关系,为完全无意识的多感觉信息整合提供了一定的证据.Arzi等人^[44]利用个体的呼吸特性(即闻好闻的气味时呼吸量会升高,反之,闻难闻气味时呼吸量降低)来衡量被试在睡眠状态下声音-气味联结强化学习的效果.学习阶段,他们采用局部强化跟踪条件化(partial-reinforcement trace conditioning)程序,向睡着的被试先后呈现声音A和好闻气味(或声音B和难闻气味),并确保被试在强化过程中始终处于睡眠状态.测验阶段,只向被试呈现学习阶段出现过的声音,并实时监测被试呼吸量变化.结果显示当呈现声音A时,被试呼吸量显著增加;反之如果向被试呈现之前经难闻气味条件化的声音B,被试的呼吸量将降低.他们还分析了不同睡眠阶段的学习效果,发现学习主要

发生在深度睡眠阶段.此外,该学习效果能够在清醒状态下得以保持,在第二个测验阶段中,被试在清醒状态下接受声音输入,同样发现呈现声音A呼吸量增加以及呈现声音B呼吸量减少的效应.上述结果表明,即使听觉和嗅觉信息都处于无意识的状态,两者仍然得以整合.然而,正如该研究的作者所承认的,尽管他们随后要求被试报告对刺激的意识程度,但实际上在睡眠状态下对刺激觉知程度的控制还是十分困难,个体可能在睡眠时仍然对刺激存在一定程度的觉察,但醒来后忘记了这一事件,因而不能再认.

Faivre和Koch^[45]首次尝试在被试清醒的情况下通过严格控制不同感觉通道信息的觉知程度的方法以考察完全无意识的视听整合过程.他们采用了反应启动(response priming)的范式.首先,在启动阶段,他们向被试呈现一对阈限下的一致(如视觉数字“6”,听觉数字“6”)或不一致(如视觉数字“8”,听觉数字“6”)的视听数字(启动刺激).然后在探测阶段,呈现一对阈限上的一致(如视觉字母“b”,听觉字母“b”)或不一致(如视觉字母“m”,听觉字母“b”)的视听字母(目标刺激).被试需要判断目标刺激中的视听字母是否一致.结果发现启动刺激与目标刺激关系一致条件下(视听数字一致且视听字母一致,或视听数字不一致且视听字母不一致)比不一致条件下(视听数字一致且视听字母不一致,或视听数字不一致且视听字母一致)反应时更短.该结果表明判断阈限上的听觉和视觉目标字母之间的关系会受到阈限下的听觉和视觉启动项数字之间的关系的影响,研究者将这个一致性启动效应作为无意识多感觉信息整合的证据,即阈限下的视觉和听觉信息能够发生无意识整合.这个巧妙的实验设计没有像以往采用传统范式的研究那样探测跨通道加工(如当被试听到数字“8”时是否会比听到其他数字时能更快地加工视觉数字“8”),而是通过让被试判断视觉和听觉刺激之间的关系来直接测量被试整合视听信息的能力,因为视觉和听觉刺激之间的这种关系比较不可能通过对单个通道的各个刺激分别单独加工得到,而是需要直接或间接地通过双模态的神经元接受来自各个感觉通道的输入,从而从功能上将视觉和听觉通道连接起来.研究者也同时考察了仅某一感觉通道信息(视觉或听觉)处于无意识条件下的多感觉信息整合,同样发现了一致性启动效应.值得注意的是在这些正式

实验开始之前,被试都接受了意识上的训练,该训练任务除了启动刺激中的视觉数字和听觉数字都是有意识地呈现外,其余和正式实验的任务一致.研究者进一步考察了有意识训练在无意识多感觉信息整合中的作用.结果发现如果事先不进行有意识训练则观察不到无意识多感觉信息整合效应.另外,通过对比意识上的训练试次和无意识的正式实验试次可以发现无意识状态下多感觉信息整合的效应量较之意识条件下的效应量要小得多,并且效应量的减弱并不能由刺激强度的减弱来解释,因为在单一掩蔽和双重掩蔽条件间并没有发现启动-目标一致性效应的显著差异.

3 无意识多感觉信息整合的加工水平

近年来,无意识多感觉信息整合领域存在着一个有意思的问题,即这些不同通道的信息的整合究竟发生在感觉水平还是语义水平上.研究者们利用不同实验范式和感觉通道属性对这一问题进行了探究.

Zhou等人^[30]认为他们所发现的无意识视嗅整合过程并非发生在语义水平,而是基于客体(object-based)水平发生,因为当只向被试呈现清水但诱导被试相信呈现的是某种气味时,并未观察到一致性效应.在后续研究中,Zhou等人^[46]利用视觉和嗅觉系统在解剖和功能上的偏侧化特性(初级视觉信息加工为对侧传导,初级嗅觉信息加工为同侧传导)进一步探究了视嗅整合发生在大脑加工中的哪个阶段.实验将玫瑰和香蕉图片分别呈现于被试两只眼的同一视野(左或右),同时将玫瑰(或香蕉)气味呈现在左或右鼻孔.结果发现,只有当图片和其相应的气味对侧呈现时(投射在同一侧大脑半球),才能观察到图片和气味的一致性效应.该研究表明双眼竞争中的视嗅整合现象在大脑加工的初级阶段就已发生.

在无意识视听整合方面,当Chen等人^[31]采用视觉呈现的词而非声音刺激作为语义线索时,则没有发现双眼竞争中发现类似视听一致性的调制效应.可见,个体并不是通过提取声音刺激中的抽象语义概念来完成视听整合的.该研究进一步通过改变被试对双眼竞争刺激的注意保持策略以及刺激对比度的方法,排除了自上而下选择性注意和材料物理属性所造成的反应偏向对视听整合的影响.综合上述结果,Chen等人^[31]推测双眼竞争中的视听一致性效应

可能是由于听觉情境增强了与其一致的视觉刺激的表征,从而更有利于该视觉刺激在双眼竞争中占据优势. Lupyan和Ward^[37]也试图探讨他们所发现的无意识视听整合过程是在感觉水平还是语义水平发生.他们采用“圆形”和“方形”这两个听觉词汇作为听觉刺激,由圆到方这个维度上连续变化的11个几何图形作为视觉刺激,并发现听觉词对不可见的图形的促进效应与图形在“从圆到方”这个维度上所处的位置有关.研究者因此认为实验中所观察到的视听整合发生在感觉水平而非语义水平.

上述来自单一通道无意识的研究均表明无意识多感觉信息整合发生在感觉水平.迄今为止,尚未有研究对完全无意识条件下的多感觉信息整合的加工水平进行探索.对于完全无意识多感觉信息整合究竟是基于感觉水平还是语义水平发生这一问题的解答可以利用基于感觉水平整合的几个基本特征,包括反比效应、刺激的空间耦合和时间同步性^[47-49]. (1) 反比效应指的是当单感觉通道的信号越微弱的时候多感觉整合的效应越显著,即整合效率与刺激强度成反比关系^[50,51]. 所以当启动项以感觉水平的方式整合的时候,启动项信号越微弱整合效应越好,即一致性启动效应量越大.相反,如果所取得的结果是由语义一致性启动效应所驱动的,那么启动项信号越强效应量越大; (2) 在空间和时间上相近的多通道刺激更有可能在感觉水平上被整合;然而,基于语义水平的整合则与各个通道刺激出现的空间位置以及时间关系无关.除了上述提及的可以通过利用基于感觉整合的基本特征进行行为实验外,脑成像研究或许可以提供神经上的指标来区分感觉整合和语义整合.感觉水平整合假说和语义水平整合假说暗示了不同的大脑激活方式,语义水平整合涉及不同感觉通道信息各自的语义抽取过程以及不同语义信息的比较对照,这一过程将在相应具有高级认知功能的脑区反映出来^[52].

4 无意识多感觉信息整合的时间界限

多感觉信息整合存在时间同步性的效应,指的是当不同通道的信息(如视觉和听觉信息)呈现的时间趋于同步时多感觉信息整合的效应越好,而当不同通道的信息呈现时间间隔超过一定的范围时则不能发生整合^[53-56]. 绝大部分的无意识多感觉信息整合研究均采用了不同通道的信息同时呈现的方

式^[25,30,31,38,40,45,46]。有少数研究者对无意识多感觉信息整合的时间窗口问题进行了探究。Chen等人通过操纵有意义的视觉刺激(如狗)和听觉刺激(如狗叫声)之间的时间间隔(SOA=0, 333, 533 ms),发现无意识跨通道促进效应并不仅在视觉与听觉刺激同时呈现的时候发生,在听觉刺激延迟333 ms呈现的情况下,仍然能够观察到听觉的促进效应,但当听觉刺激延迟533 ms呈现的情况下,促进效应消失。因此,研究者认为很有可能存在一个短时缓冲器,能够短暂地保持各个感觉通道刺激的表征以便于形成一个完整的多感觉客体表征。

Chen和Spence^[26]通过操纵视觉掩蔽刺激与目标刺激之间的时间间隔(interstimulus interval, ISI)来考察无意识条件下视听整合的时间机制。实验中掩蔽刺激与目标刺激为不同的大写字母,呈现时长均为40 ms,两者的时间间隔为0, 13, 27, 40, 80或133 ms。其中有1/2试次在呈现视觉目标刺激的同时伴随听觉刺激,听觉刺激为纯音信号,呈现时长为27 ms。实验包括2个部分,被试需要在不同的部分分别完成字母识别任务(letter identification task)和字母检测任务(letter detection task)。在字母识别任务中,被试需要报告所看到的第一个字母(即被掩蔽的目标刺激),该任务用于考察听觉刺激促进视觉信息加工的时间进程;在字母检测任务中,被试需要判断在1个试次中看到的是一个还是2个字母,该任务用于考察被试将掩蔽刺激与目标刺激区分开来的最短时距。结果发现,字母识别任务中,声音促进效应仅出现在ISI为27和40 ms的条件,而字母检测任务中,声音的促进作用则发生在更短的ISI时间窗口(13 ms),且在ISI大于21~22 ms的情况下被试才能将目标刺激和掩蔽刺激区分成2个字母。

5 无意识多感觉信息整合的机制解释

有关无意识多感觉信息整合的研究还更多地停留在现象的阶段,对机制的探讨并不充分。先前研究者普遍认为跨通道信息整合以知觉组织为前提^[57,58],但在Ngo和Spence^[25]的视觉掩蔽实验中,即使视觉刺激不可见,不同感觉通道之间的相互作用仍然存在,因此跨通道整合不能完全由知觉组织来解释,他们认为有可能是听觉或触觉刺激作为时间标记有助于视觉刺激的捕捉,也有可能是高频的刺激提高了视觉刺激的显著性进而促进其加工;也有研究者进一

步指出这可能是由于视觉刺激与其他通道刺激(听觉或触觉)之间的一致性导致的^[45]。

前文所述的Chen和Spence^[26]通过考察无意识多感觉整合的时间界限问题对前人提出的3个关于跨通道的促进效应的机制假说,即准备增强假说(preparedness-enhancement hypothesis)、信号增强假说(signal-enhancement hypothesis)以及客体增强假说(object-enhancement hypothesis)进行了检验。他们发现的字母识别任务中的听觉促进效应只发生在有限的时间窗口内(27和40 ms),而在其他时间窗口(0, 13, 80和133 ms)则不存在促进效应,该结果与准备增强假说的预测不一致。另外,在ISI为0 ms的情况下没有发现听觉增强效应,这与信号增强假说不一致。结合字母识别任务和字母检测任务的结果可以发现,在字母识别任务中观察到的听觉促进效应所在的时间窗口(27和40 ms)正好处于被试能够可靠地区分掩蔽刺激和目标刺激为2个字母的时间窗口(21~22 ms)之外,这些结果表明在掩蔽范式下的听觉促进效应与被试分离随后呈现的2个视觉刺激的能力有关。也就是说,声音的呈现很有可能增强了对同时呈现的视觉刺激的表征,从而降低该视觉刺激的表征被掩蔽刺激所破坏的可能性。这与客体增强假说相符。

关于完全无意识多感觉整合,Faivre和Koch^[45]假设存在2个可能的互不排斥的机制能够解释他们所发现的无意识多感觉信息整合中意识的促进效应。其中之一是视听配对在有意识条件下的有意识加工能够分别促进听觉和视觉数字各自的加工而非两者的整合。在有意识的训练之后,启动刺激中的听觉和视觉数字的无意识加工得到增强,随后便能够促进他们的无意识整合。在没有意识训练的情况下,视觉和听觉数字的无意识加工很微弱,从而导致无意识整合的失败。与这个解释相符合的现象是多感觉体验能够对随后的单感觉信息加工产生持久的促进效应^[60]。另一个可能的解释是有意识训练能够促进整合过程本身,而不只是整合成分中的各个单感觉通道加工。也就是说,刺激和任务情景的有意识暴露能够使视听数字的整合机制成为可能。只有当视听信息的整合机制事先在有意识的情况下被激活,它们才能在随后无意识的情况下被自动激活。支持这个解释的现象既有被试形成新的策略以及适应新的刺激和任务需要意识的作用,还有多感觉信息整合非

常容易受到情境因素的影响^[61,62].

6 总结与展望

4D甚至7D电影已经渐渐开始走进观众视野,因其愈加真实的代入感而为人称赞.实际上,人们每天都接收着来自环境周遭的各种不同物理和化学信号输入,而我们大脑却可以将如此成千累万不同形式的信息自动整合成为连续统一体.这种多感觉知觉体验的统一性在意识理论框架中提出了一个很重要的问题:多感觉信息整合能否在意识出现之前发生.有赖于以往人们对视觉系统研究的丰富成果和宝贵经验,尤其是在视觉无意识范式上的革新(如视觉掩蔽范式、双眼竞争范式以及连续闪烁抑制范式等),过去10年间,越来越多研究者以视觉无意识为突破口,将这些范式扩展应用到了无意识多感觉整合的研究中.

早期有关无意识多感觉信息整合的研究表明处于无意识水平(如视觉掩蔽、双眼竞争、连续闪烁抑制等)的视觉刺激的加工能够受到意识上的一致和不一致的听觉、嗅觉、触觉等刺激所影响^[22].由于这些研究只掩蔽了视觉通道的信息,而另一感觉通道的信息则仍然处于意识上,这样并不能完全说明意识与多感觉信息整合的关系.最近有研究者提出需要在两通道或多通道信息皆处于无意识状态的条件下来考察无意识多感觉信息整合的问题.同时,他们也进行了这方面的尝试,通过利用反应启动范式观察到即使视觉和听觉信息都处于阈限水平下,两者也能得到一定程度的整合^[45].这更进一步地验证了多感觉信息整合能够在各通道信息处于无意识的状态下发生.

这些无意识多感觉信息整合的研究结果挑战了意识对整合来说是必需的观点,但这并不能完全支持意识在整合中没有作用这样的论断,它们仅暗示有些整合过程能够在无意识的情况下发生.事实上,无意识多感觉信息整合的应用范围非常有限.有研究者发现处于不可见状态的视觉唇部运动序列能够与听觉刺激相整合,但是不会产生在意识状态时观察到的McGurk效应,表明整合成新的知觉体验需要意识.另外,完全无意识多感觉整合的研究发现意识和无意识条件下的多感觉信息整合的效应量区别很大,并且无意识多感觉信息整合需要事先经过有意识训练.该发现对于意识在多感觉整合中的作用

提供新的启示,通常意识在整合中所起的作用以全或无的方式描述,Faivre和Koch^[45]比较了有意识和无意识多感觉整合的效应量,提出有意识训练能够促进无意识整合,揭示意识和整合的关系比之前假设的要更复杂一些.

Faivre和Koch^[45]的研究对整合和意识的关系问题具有振奋人心的贡献,他们通过同时掩蔽视觉和听觉刺激的方法,为无意识多感觉信息整合研究提供了一个崭新的方向.但是该研究方向还处于起步阶段,其背后的精确机制目前还不清楚.未来可以从以下一些方面来继续思索和探究完全无意识多感觉信息整合:

(1) 有意识训练对完全无意识多感觉信息整合的促进作用究竟是基于各个感觉通道的加工过程还是基于整合过程本身,现有的研究结果还不能对这一问题做出解答,从而需要进一步的探索.例如,可以设计这样的实验,在有意识训练阶段采用奇数(如1, 3等),而在正式实验阶段采用偶数(如2, 4等),如果在这样的情况下还能发现无意识多感觉信息整合现象,则能支持促进整合过程的解释,而促进各个感觉通道加工过程的解释变得不太可能.

(2) 现有的研究只采用了简单的视听数字和字母作为整合刺激,对于复杂刺激,如动物的图像和声音,是否可以在完全无意识的情况下得到整合尚不清楚,倘若能发生整合,是否和简单刺激一样需要经过事先的有意识训练呢?对于在日常生活中人们经常接触到的更具生态意义的刺激如走路的光点小人(point-light walker)和脚步声,是否可以在没有经过有意识训练的条件下就能得到完全无意识整合呢?今后的研究需要通过操控多通道刺激的复杂性、新颖性以及生态价值对上述问题进行探究,只有这样研究者才能够提供关于意识在多感觉整合过程中的作用的综合解释.

(3) 这些在视觉和听觉两个通道得出的研究结果是否同样符合它们与其他感觉通道信息的整合呢?目前由于实验技术的限制,对于其他感觉通道(如触觉、嗅觉等)的无意识加工方面的研究并不充分.有研究者提出了双鼻竞争的范式^[64],能够使某一鼻孔的嗅觉信息短暂地处于被抑制的状态.未来研究应该着手增加嗅觉模态来探讨完全无意识的多感觉信息整合(视觉、听觉、嗅觉).

(4) 多感觉信息在完全无意识的情况下整合的

神经机制又是怎样的呢？根据以往研究者的理论，存在2个可能的机制能够支持这种无意识多感觉整合。完全无意识多感觉整合可以通过不与整体工作空间相连接的封闭神经元来完成，这种神经元存在于较低水平的大脑结构中，包括皮层下区域如上丘^[14,65,66]。完全无意识多感觉整合也可以通过在刺激呈现后很快发生的感觉皮层区域间的前馈连接(feed-forward connections)来完成，这种快速的、早期的整合自然能够在无意识的情况下发生^[67]。以往有关多感觉整合的行为研究和神经成像研究是2个相对独立的研究领域，未来的研究应采用心理物理学范

式与脑功能成像技术相结合的方法进一步探究完全无意识多感觉信息整合的神经机制，从而有助于人们对意识与整合的关系有更为深入的了解。

(5) 基于现有研究发现，学者们基本肯定多感觉信息整合能够在各通道信息处于无意识的状态下发生，并且也有些研究试图进一步回答该过程中的时间界限、加工水平以及机制解释等问题。对于这些问题的解答可能与实验采用的不同刺激属性、任务设置以及通道属性等有关。未来的研究应通过操纵这些因素对完全无意识条件的多感觉信息整合的时间界限、加工水平以及机制解释等问题进行系统探索。

参考文献

- 1 Gilbert A N, Martin R, Kemp S E. Cross-modal correspondence between vision and olfaction: The color of smells. *Am J Psychol*, 1996, 109: 335–351
- 2 Zmigrod S, Hommel B. Temporal dynamics of unimodal and multimodal feature binding. *Atten Percept Psychophys*, 2010, 72: 142–152
- 3 Vatakis A, Spence C. Crossmodal binding: Evaluating luating the “unity assumption” using audiovisual speech stimuli. *Percept Psychophys*, 2007, 69: 744–756
- 4 Balduzzi D, Tononi G. Integrated information in discrete dynamical systems: motivation and theoretical framework. *PLoS Comput Biol*, 2008, 4: e1000091
- 5 Tononi G. Integrated information theory of consciousness: An updated account. *Arch Ital Biol*, 2012, 150: 56–90
- 6 Edelman G M, Tononi G. *A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination*. New York: Basic Books, 2000
- 7 Kim C Y, Blake R. Psychophysical magic: Rendering the visible “invisible.” *Trends Cogn Sci*, 2005, 9: 381–388
- 8 Fahrenfort J J, Lamme V A F. A true science of consciousness explains phenomenology: Comment on Cohen and Dennett. *Trends Cogn Sci*, 2012, 16: 138–139
- 9 Koch C. *Consciousness: Confessions of a Romantic Reductionist*. Cambridge: MIT Press, 2012
- 10 Treisman A. *Consciousness and Perceptual Binding. The Unity of Consciousness*. Oxford: Oxford University Press, 2003. 95–113
- 11 James W. *The Principles of Psychology*. London: Macmillan, 2012
- 12 Kant I. *The Critique of Pure Reason*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- 13 Descartes R, Adam C, Tannery P. *Oeuvres de Descartes: Meditationes de Prima Philosophia*. Paris: Librairie Philosophique, 1973
- 14 Dehaene S. *Consciousness and the Brain: Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts*. Old Saybrook: Tantor Media, 2014
- 15 Dehaene S, Changeux J P. Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 2011, 70: 200–227
- 16 Massimini M, Ferrarelli F, Huber R, et al. Breakdown of cortical effective connectivity during sleep. *Science*, 2005, 309: 2228–2232
- 17 Massimini M, Ferrarelli F, Murphy M, et al. Cortical reactivity and effective connectivity during REM sleep in humans. *Cogn Neurosci*, 2010, 1: 176–183
- 18 Ferrarelli F, Massimini M, Sarasso S, et al. Breakdown in cortical effective connectivity during midazolam-induced loss of consciousness. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 2681–2686
- 19 Casali A G, Gosseries O, Rosanova M, et al. A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior. *Sci Transl Med*, 2013, 5: 198ra105
- 20 Tononi G. Consciousness: Philosophy. In: Squire L R, ed. *Encyclopedia of Neuroscience, Consciousness and Emotion*. 4th Ed. Oxford: Academic Press, 2009, 12. 117–123
- 21 Oizumi M, Albantakis L, Tononi G. From the phenomenology to the mechanisms of consciousness: Integrated Information Theory 3.0. *PLoS Comput Biol*, 2014, 10: e1003588
- 22 Deroy O, Chen Y C, Spence C. Multisensory constraints on awareness. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2014, 369: 20130207
- 23 Marcel A J. Conscious and unconscious perception: Experiments on visual masking and word recognition. *Cognit Psychol*, 1983, 15: 197–237
- 24 Breitmeyer B G. Visual masking: Past accomplishments, present status, future developments. *Adv Cogn Psychol*, 2008, 3: 9–20

- 25 Ngo M K, Spence C. Crossmodal facilitation of masked visual target identification. *Atten Percept Psychophys*, 2010, 72: 1938–1947
- 26 Chen Y C, Spence C. The crossmodal facilitation of visual object representations by sound: Evidence from the backward masking paradigm. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2011, 37: 1784–1802
- 27 Chen Y C, Spence C. When hearing the bark helps to identify the dog: Semantically-congruent sounds modulate the identification of masked pictures. *Cognition*, 2010, 114: 389–404
- 28 Blake R, Logothetis N K. Visual competition. *Nat Rev Neurosci*, 2002, 3: 13–21
- 29 Tong F, Nakayama K, Vaughan J T, et al. Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex. *Neuron*, 1998, 21: 753–759
- 30 Zhou W, Jiang Y, He S, et al. Olfaction modulates visual perception in binocular rivalry. *Curr Biol*, 2010, 20: 1356–1358
- 31 Chen Y C, Yeh S L, Spence C. Crossmodal constraints on human perceptual awareness: Auditory semantic modulation of binocular rivalry. *Front Psychol*, 2011, 2: 212
- 32 Breitmeyer B G, Ro T, Ogmen H. A comparison of masking by visual and transcranial magnetic stimulation: Implications for the study of conscious and unconscious visual processing. *Conscious Cogn*, 2004, 13: 829–843
- 33 Tsuchiya N, Koch C. Continuous flash suppression reduces negative afterimages. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1096–1101
- 34 Fang F, He S. Cortical responses to invisible objects in the human dorsal and ventral pathways. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1380–1385
- 35 Jiang Y, He S. Cortical responses to invisible faces: Dissociating subsystems for facial-information processing. *Curr Biol*, 2006, 16: 2023–2029
- 36 Jiang Y, Costello P, Fang F, et al. A gender- and sexual orientation-dependent spatial attentional effect of invisible images. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 17048–17052
- 37 Lupyan G, Ward E J. Language can boost otherwise unseen objects into visual awareness. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 14196–14201
- 38 Palmer T D, Ramsey A K. The function of consciousness in multisensory integration. *Cognition*, 2012, 125: 353–364
- 39 Jiang Y, Costello P, He S. Processing of invisible stimuli: Advantage of upright faces and recognizable words in overcoming interocular suppression. *Psychol Sci*, 2007, 18: 349–355
- 40 Alsius A, Munhall K G. Detection of audiovisual speech correspondences without visual awareness. *Psychol Sci*, 2013, 24: 423–431
- 41 Lunghi C, Binda P, Morrone M C. Touch disambiguates rivalrous perception at early stages of visual analysis. *Curr Biol*, 2010, 20: R143–R144
- 42 Salomon R, Lim M, Herbelin B, et al. Posing for awareness: Proprioception modulates access to visual consciousness in a continuous flash suppression task. *J Vis*, 2013, 13: 1–8
- 43 Baars B J. The conscious access hypothesis: Origins and recent evidence. *Trends Cogn Sci*, 2002, 6: 47–52
- 44 Arzi A, Shedlesky L, Ben-Shaul M, et al. Humans can learn new information during sleep. *Nat Neurosci*, 2012, 15: 1460–1465
- 45 Faivre N, Koch C. Temporal structure coding with and without awareness. *Cognition*, 2014, 131: 404–414
- 46 Zhou W, Zhang X, Chen J, et al. Nostril-specific olfactory modulation of visual perception in binocular rivalry. *J Neurosci*, 2012, 32: 17225–17229
- 47 Meredith M A, Nemitz J W, Stein B E. Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *J Neurosci*, 1987, 7: 3215–3229
- 48 Stein B, Meredith A. *The Merging of the Senses*. Cambridge: MIT Press, 1993
- 49 Wallace M T, Stein B E. Early experience determines how the senses will interact. *J Neurophysiol*, 2007, 97: 921–926
- 50 Meredith M A, Stein B E. Interactions among converging sensory inputs in the superior colliculus. *Science*, 1983, 221: 389–391
- 51 Stevenson R A, James T W. Audiovisual integration in human superior temporal sulcus: Inverse effectiveness and the neural processing of speech and object recognition. *NeuroImage*, 2009, 44: 1210–1223
- 52 Noel J P, Wallace M, Blake R. Cognitive neuroscience: Integration of sight and sound outside of awareness? *Curr Biol*, 2015, 25: R157–R159
- 53 van Atteveldt N M, Formisano E, Blomert L, et al. The effect of temporal asynchrony on the multisensory integration of letters and speech sounds. *Cereb Cortex*, 2007, 17: 962–974
- 54 Möttönen R, Schürmann M, Sams M. Time course of multisensory interactions during audiovisual speech perception in humans: A magnetoencephalographic study. *Neurosci Lett*, 2004, 363: 112–115
- 55 Nozaradan S, Peretz I, Mouraux A. Steady-state evoked potentials as an index of multisensory temporal binding. *NeuroImage*, 2012, 60: 21–28
- 56 Sarko D K, Nidiffer A R, Powers III A R, et al. Spatial and Temporal Features of Multisensory Processes: Bridging Animal and Human Studies. *The Neural Bases of Multisensory Processes*. Boca Raton (FL): CRC Press, 2012
- 57 O’Leary A, Rhodes G. Cross-modal effects on visual and auditory object perception. *Percept Psychophys*, 1984, 35: 565–569

-
- 58 Vroomen J, de Gelder B. Sound enhances visual perception: Cross-modal effects of auditory organization on vision. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2000, 26: 1583–1590
- 59 Ngo M K, Spence C. Crossmodal facilitation of masked visual target identification. *Atten Percept Psychophys*, 2010, 72: 1938–1947
- 60 Thelen A, Murray M M. The efficacy of single-trial multisensory memories. *Multisens Res*, 2013, 26: 483–502
- 61 Dehaene S, Naccache L. Towards a cognitive neuroscience of consciousness: Basic evidence and a workspace framework. *Cognition*, 2001, 79: 1–37
- 62 van Atteveldt N, Murray M M, Thut G, et al. Multisensory integration: Flexible use of general operations. *Neuron*, 2014, 81: 1240–1253
- 63 Faivre N, Mudrik L, Schwartz N, et al. Multisensory integration in complete unawareness: Evidence from audiovisual congruency priming. *Psychol Sci*, 2014, 25: 2006–2016
- 64 Zhou W, Chen D. Binaral rivalry between the nostrils and in the cortex. *Curr Biol*, 2009, 19: 1561–1565
- 65 Stein B E, Stanford T R. Multisensory integration: Current issues from the perspective of the single neuron. *Nat Rev Neurosci*, 2008, 9: 255–266
- 66 Meredith M A, Stein B E. Visual, auditory, and somatosensory convergence on cells in superior colliculus results in multisensory integration. *J Neurophysiol*, 1986, 56: 640–662
- 67 Schroeder C E, Foxe J. Multisensory contributions to low-level, “unisensory” processing. *Curr Opin Neurobiol*, 2005, 15: 454–458
-

Recent progress in the study of consciousness and multisensory integration

LIU Rui^{1,2}, WANG Li¹ & JIANG Yi¹

¹ State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, CAS Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Consciousness has long been proposed to be necessary for multisensory integration. In recent years, however, some researchers have found that multisensory integration can occur even when the information from the visual modality are rendered unconscious (e.g., under visual masking, binocular rivalry or continuous flash suppression). Furthermore, a more recent study demonstrates that two subliminal stimuli of different modalities (i.e., vision and audition) can nevertheless be integrated in complete unawareness, providing more compelling evidence for unconscious multisensory integration. Although these studies challenge previous claims that multisensory integration requires consciousness, the notion that consciousness has no functional role in multisensory integration may not be supported. Here we review recent work on unconscious multisensory integration (including its processing level, temporal window and underlying mechanism) and point to future research directions, offering a new understanding of the relationship between consciousness and multisensory integration.

multisensory integration, consciousness, unconsciousness, cross-modal information processing, vision

doi: 10.1360/N972015-00666



王莉

博士 中国科学院心理研究所副研究员，硕士生导师，入选 2014 年中国科学院青年创新促进会。从事生物运动信息知觉、无意识信息知觉以及跨通道信息整合与交互作用等方面的研究，相关研究成果发表在 *Proc Natl Acad Sci USA*, *Neurosci*, *NeuroImage*, *Psychol Sci* 等学术期刊。