



跨通道迁移及其认知神经机制*

孙莹^{1,2)} 孙洵伟³⁾ 王一帆^{1,2)} 付秋芳^{1,2)**}

⁽¹⁾ 中国科学院心理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101; ⁽²⁾ 中国科学院大学心理学系, 北京 100049;

⁽³⁾ 北京大学心理与认知科学学院, 北京 100871)

摘要 跨通道迁移是指将在一种感觉通道获得的知识应用于另一感觉通道的能力。跨通道迁移的相关研究探索了大脑表征不同感觉通道信息的方式, 为减少重复学习、提高认知加工效率提供了新的见解。为较好地概括跨通道迁移的特点和机制, 本文首先介绍了在物体识别、类别学习和时间知觉等不同领域对跨通道迁移效应的实验研究, 之后介绍了支持跨通道迁移的表征类型和相关理论, 梳理了跨通道迁移产生的理论及采用事件相关电位(ERP)和功能磁共振成像(fMRI)等技术探讨跨通道迁移神经机制的研究进展, 并指出了影响跨通道迁移的因素。最后, 对目前跨通道迁移研究成果及其潜在应用进行了总结, 并对这一领域未来的研究问题进行了展望。

关键词 跨通道迁移, 多通道表征, 跨通道识别, 通道优势, 元通道理论

中图分类号 B845, R338

DOI: 10.16476/j.pibb.2022.0508

当根据言语描述在杂乱的箱子里翻找物品时, 即使无法看见, 也可以通过触摸很轻松地找到。这种将一种感觉通道的知识或信息, 应用于另一种感觉通道的能力即为跨通道迁移。这一现象说明, 输入信息可能在大脑中具有独立于感觉通道的表征形式, 从而使得信息可以在不同感觉通道间发生迁移^[1]。跨通道迁移不仅有助于个体避免重复学习, 实现行为目标, 还会提高个体识别绩效, 增加知识技能的灵活性^[2]。同时, 洞悉跨通道迁移的表征类型和认知机制, 也有利于人工智能领域构建更为灵活的迁移学习算法, 并有助于设计更适用的感觉替代装置, 提高信息在不同通道间的迁移能力^[3-4]。跨通道迁移的研究之间差异较大, 研究目的和实验范式各不相同。为了较好地概括和阐释跨通道迁移的特点和机制, 本文首先介绍物体识别、类别学习和时间知觉等不同领域的跨通道迁移研究, 阐述跨通道迁移的概念以及主要研究内容、研究范式和研究结果, 之后介绍支持跨通道迁移的表征类型和认知机制, 梳理了跨通道迁移产生的理论及神经机制的研究进展, 并指出了影响跨通道迁移的因素。最后, 对目前跨通道迁移的研究成果的潜在应用进行总结, 并对这一领域未来的研究问题进行展望。

1 跨通道迁移

跨通道迁移广泛存在于各种知识、技能和社会规范的学习中。下面将通过介绍跨通道识别和类别学习中的跨通道迁移, 阐述一种感觉通道获得的物体识别和分类知识如何被应用于另一感觉通道, 并通过介绍时间知觉训练的跨通道迁移, 阐释感知训练等一般能力是否可以跨通道迁移。

1.1 跨通道识别

跨通道识别指个体将物体识别知识在不同感觉通道间进行迁移的能力^[5], 主要表现为在某一感觉通道习得物体识别信息后, 该信息可以增强或影响目标通道刺激的判别和检索绩效。例如, 研究发现, 个体通过视觉通道识别新异物体后, 所学知识可以迁移至触觉通道, 反之亦然^[6-7]。个体还可以利用跨通道线索完成视觉搜索任务^[8], 并且跨通道线索(声音线索)的搜索绩效优于单通道条件

* 科技部国家重点研发计划(2018AA0100205), 国家自然科学基金(62061136001)和德国研究基金(DFG TRR-169)资助项目。

** 通讯联系人。

Tel: 010-64845395, E-mail: fuqf@psych.ac.cn

收稿日期: 2022-10-27, 接受日期: 2023-04-03

(图像、文字线索)。同时, 在视-触^[9]和视-听^[10]通道间均发现了跨通道启动效应。例如, 采用经典的S1-S2启动范式发现, 相比于语义不一致的刺激对, 人们对语义一致的跨通道刺激对的反应时间会更短。这种促进效应说明, 个体会将不同通道的刺激视作相同的对象, 使得物体识别信息可以发生跨通道迁移^[10]。

那么是否只有人类才具有跨通道识别能力呢? 采用违反期望范式和优先注意范式等动物研究中经典的跨通道识别任务范式, 研究发现, 多数动物也具有跨通道识别能力^[11]。其中, 违反期望范式是指先给动物被试提供关于某一熟悉身份的一种感觉线索(如实际看到一匹同伴马^[12]), 移除线索后再向其提供另一熟悉身份的另一种感觉线索(如另一同伴马的声音), 由于这两种感觉线索不一致, 违背了动物被试的预期, 不一致线索会导致比一致线索更长的关注时间。而优先注意范式则是指先向

如卷尾猴等动物被试呈现猕猴、人类和其他卷尾猴的声音和面孔^[13], 使它们对这些刺激之间形成跨通道对应, 之后在测试中若发现动物被试观看匹配的面部刺激比不匹配的面部刺激更久, 就证明动物被试具有跨通道识别的能力。例如, 研究发现, 在学习阶段训练黄蜂对视觉或触觉的目标物体进行奖赏学习, 随后在同通道和跨通道的4种迁移条件下分别考察黄蜂对测试物体的学习绩效, 实验流程如图1所示。结果发现, 两种跨通道迁移条件下, 黄蜂接触在学习阶段所习得物体的时间均显著更长, 表明黄蜂可以进行跨通道识别^[14]。此外, 还发现章鱼^[15]和卷尾猴^[16]均具有在视-触通道间进行跨通道识别的能力, 弱电鱼则可以在视觉和电感觉(electric senses)间进行跨通道识别^[17-18]。这些研究表明, 无论是人类还是动物均可以形成关于物体的多通道表征, 跨通道识别能力可能并不依赖于语言加工过程。

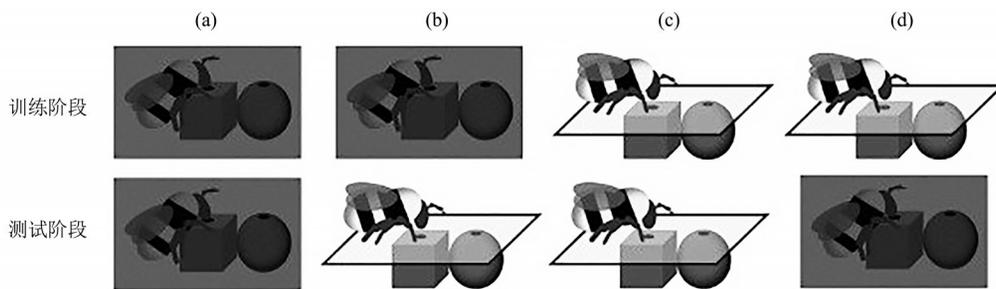


Fig. 1 The procedure of crossmodal recognition task^[14]

图1 跨通道识别任务实验图示^[14]

实验包括视觉和触觉两种实验条件, 视觉条件下提供照明但是黄蜂不能接触到物体; 触觉条件不提供照明, 但是黄蜂能用其探针刺入物体的孔洞, 可以接触到物体。在视觉或触觉条件下的学习阶段, 训练黄蜂学习识别两个物体(圆形或方形)中哪一个有奖励, 随后在同通道((a)触觉-触觉;(c)视觉-视觉)和跨通道((b)触觉-视觉;(c)视觉-触觉)4种迁移阶段考察黄蜂对两个物体的接触时间。结果发现, 在同通道和跨通道迁移任务中, 黄蜂都对学习阶段所习得物体的接触时间更长, 说明黄蜂可以将物体识别知识进行跨通道迁移^[14]。

1.2 类别学习中的跨通道迁移

类别学习中的跨通道迁移是指个体将在一种感觉通道获得的类别知识迁移到其他感觉通道的能力, 具体表现为在一种通道习得的类别知识可以提高对另一通道刺激的分类绩效。研究发现, 单维度特征的类别知识可以在视-触通道间进行迁移^[19-20]。例如, 有研究使用3D打印技术, 将计算机生成的形状各异的新奇物体打印出来, 学习者通过视觉或触觉对这些物体进行类别学习, 结果发现, 视觉训练不仅提高了视觉绩效, 还能提高触觉绩效, 反之亦然^[19]。使用异同辨别任务的动物研究也发现,

类别知识可以在视-听通道发生迁移^[21]。并且, 学习者习得的分类边界在度量空间中的位置也可以进行跨通道迁移, 提高边界附近物体的可分辨性^[19]。这些研究表明, 通过视觉或触觉通道获得的表征, 可能部分被抽象为具有通道通用性的多通道表征, 从而促进物体信息在通道间进行迁移。

不过, 在考察个体是否可以将习得的两维度分类规则进行跨通道迁移时, 结果尚不一致。有研究发现, 无论是学习视觉联合规则还是信息整合, 人们均未能将习得的视觉分类规则迁移至听觉通道刺激^[22]。也有研究发现, 学习视听联合规则的被试

可以将习得的类别知识进行跨通道迁移,但学习视听信息整合类别结构的被试则不可以进行跨通道迁移^[23]。由于自然界中类别结构通常并不是由单一维度界定的,更多时候需要人们整合不同维度的信息来形成类别表征,未来研究不仅需要进一步明确可以发生跨通道迁移的类别结构的特点,还需要深入探索影响不同类别结构跨通道迁移的因素。

此外,研究还发现,对基本视觉特征的细微差异,如线条朝向或辨别点的运动方向等,进行辨别学习时,知觉学习的绩效无法进行跨通道迁移^[24-26]。这通常被认为是由于知觉学习所形成的表征依赖于训练刺激,是通道特异的。不过,也有研究发现,通过新异的训练策略可以使得视知觉学习绩效迁移至其他感觉通道,表明知觉学习也可能以一种知觉不变的方式形成抽象表征^[27-28]。这些研究说明,抽象表征的习得可能是进行跨通道迁移的重要条件,它使得个体可以灵活地做出适应性行为,但目前尚不清楚抽象表征的产生是否是进行跨通道迁移的必要条件。

1.3 时间知觉的跨通道迁移

目前,感知能力训练的跨通道迁移也得到研究者的重视。其中,因亚秒(sub-second)时间知觉对于语言感知、运动感知和运动协调等感知任务以及跨通道信息交互和整合十分重要^[29],因此得到了广泛的关注。研究多采用如时长辨别任务^[30]、生成任务^[31]和时序判断任务^[32]等经典范式,考察时间间隔感知能力的改善是否可以跨通道迁移。研究发现,跨通道(如听觉和触觉)的时长辨别训练有利于提高视觉通道的感知^[33-35],这种时间知觉的跨通道迁移效应还包括从视觉到听觉^[36],以及从听觉到动觉^[31, 37]等。除有明确学习指导语的外显任务外,也有研究采用如视觉 Ternus 运动感知任务等内隐范式,发现个体可以内隐地提高目标感觉通道的时间知觉绩效并发生跨通道迁移^[33]。不过,值得指出的是,部分研究未能重复验证时间辨别能力可以从听觉跨通道迁移至视觉通道^[38],或者是仅观察到单向的跨通道迁移效应,即时间辨别能力的绩效改善可以从听觉迁移至视觉通道,反之则不可以^[34]。

除时长知觉的迁移效应外,有研究比较了音乐家和非音乐家视觉和听觉时序判断任务的最小可觉差和主观相等点的差异^[39],发现长期的音乐训练有利于提高个体对于视觉和视听组合的时间视敏锐度,提高个体区分感觉通道间的不同时序刺激差异

的一般能力。不过,在考察时序知觉学习迁移效应的一项研究中^[40],仅发现跨通道时序知觉的改善可以迁移到视觉而非听觉,并且单通道时序知觉训练无法发生跨通道迁移。

一项感知能力的训练结果可以进行跨通道迁移,意味着这种感知能力的训练所形成的特定能力会扩展为一般能力,从而能够影响和提高其他任务的绩效。由于不同感觉通道刺激的信息存在着巨大的差异,感知能力之间的泛化和迁移背后所依赖的是何种机制尚不清楚,仍有待于未来进一步的研究。

2 跨通道迁移依据的表征类型及相关理论

表征是指信息存储在大脑中的方式,可分为通道特异性表征和通道通用性表征。通道特异性表征是指获得的知识表征是具体的、对刺激特征敏感,并且依赖输入通道;而通道通用性表征是指获得的知识表征是抽象的、不受刺激的表面特征或输入通道的影响,并且独立于感觉通道^[41]。有研究者认为,跨通道迁移依赖的是抽象的、具有通道通用性的表征,而不是具体的、具有通道特异性的表征。但也有研究认为,跨通道迁移并不依赖于抽象表征,而是依赖于不同通道的表征之间形成的联结或者以多通道表象为中介。

2.1 多通道假说

多通道假说是解释跨通道迁移的表征类型的主要理论^[1, 19]。该假说认为,人们利用物体或事物的通道特异性(modality-specific)表征,提取或推断物体或事件的内在固有的、通道独立(modality-independent)的属性^[42],以非通道特异性的(amodal)或多通道的形式来表征这些属性,并且不同感觉通道的表征之间相互联系,构成跨通道迁移的基础^[43]。例如,人们在视觉通道内习得的知识可以被应用于触觉测验,表明在视觉物体识别的过程中形成的表征并不依赖于视觉通道^[1, 19]。

也有研究者试图从计算的角度,通过模态不变性假说来解释多通道表征促进跨通道迁移的现象^[44]。模态不变性是指,人们对环境事件的神经表征是模态不变的,当事件具有相同的表征而不受限于感知它的感觉通道时,该事件就会更容易识别、推理和学习,并且通过任意一种感觉通道感知事件均会激活其多通道表征^[43]。例如,运动后效被证实可以在视-触通道间迁移,表明存在视-触通道间共享的运动表征^[45]。此外,无论物体被看见

或是被触摸, 在外侧枕叶复合区可以观察到相似的激活模式^[46]。

该假说得到很多认知神经成像研究的支持。例如, 有研究发现, 对新异三维物体的视觉和触觉编码, 会引起侧枕叶相似的神经活动模式, 支持人脑是以多模态编码的方式表征物体^[44]。脑成像研究发现^[47], 与未接触过的物体相比, 两组熟悉物体无论是单通道条件(视觉-视觉组)还是跨通道条件(视觉-触觉组)均表现出相似的习惯化水平, 尤其是在外侧枕叶表现出了较低的激活。类似地, 视听刺激短暂同步呈现后的习惯化, 使得听觉刺激在随后的任务中自动地激活初级视觉皮层^[48]。同时, 在一项考察纹理类别知识在视-触通道间迁移的功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究中^[20]发现, 除与学习相关脑区, 如顶叶上回、背侧前扣带皮层和右侧背外侧前额叶皮层等脑区激活减少外, 单通道训练组(视觉训练-视觉测验)负责视觉纹理加工的左内侧枕叶皮质表现出更大的激活, 但是跨通道训练组(视觉训练-触觉测验)则表现为双内侧枕叶的激活。

此外, 研究者在记录内侧颞叶的神经活动时甚至发现, 人们的大脑包含有“概念”细胞^[49], 这些细胞涉及自然人或事物的表征, 而这些表征与感知这些人或事物的感觉通道无关。例如, 一个神经元可以选择性地对个体相关信息做出反应, 包括某一公众人物的形象图像、书面名称或者其名字的语音^[50]。由此研究者指出, 内侧颞叶的一个功能是形成多通道信息间的联结, 该联结网络会加工来自多种感觉通道的信息。相比于元通道脑区具有加工特定功能或计算模式的先天结构限制, 多通道表征是在多通道整合的过程中逐渐形成的^[51]。新形成的表征可能出现在单个神经元水平上, 也可能在神经集群的水平上进行编码, 不限于单感觉通道。

2.2 多通道心理表象

表象是对当前不存在的物体或事件的一种表征形式。当客观事物不在眼前时, 表象可使头脑中栩栩如生地呈现事物的形象^[52]。表象会影响或改变个体感知到的信息。例如, 有研究发现想象可以与知觉刺激相结合, 从而诱发交叉碰撞错觉、腹语术效应和麦格克效应等经典的多感觉错觉^[53]。在日常生活中, 人们更多接触的是多感觉事件或事物, 很少以孤立的感觉通道进行感知, 甚至即使感知到的信息是单通道的, 信息也会与其他感觉通道发生交互。例如, 视觉通道感知到的信息可以诱发听觉

心理表象。因此, 有研究者提出, 可以用人类大脑高级中枢内部表征的多通道心理表象(multimodal mental imagery)来解释跨通道迁移现象^[54]。多通道心理表象是指, 由一种感觉通道的刺激所诱发的其他感觉通道的心理表象以及该通道对应的早期感觉皮层激活^[54-55]。例如, 在不呈现声音的情况下, 仅观察与语言相关的面部运动(如唇读)时, 视觉信息也会激活初级听觉皮层和颞上回前部^[56-57]。此时, 多通道心理表象是涉及意识、非随意的、伴随着个体的真实存在感, 并且可以将想象的对象定位在自我中心空间或抽象空间中。

这一理论认为, 触觉诱发的视觉皮层激活是由于视觉表象的中介作用, 而不是被躯体感觉输入信息直接激活的^[58]。相关的神经科学证据发现, 无论是先天盲人还是明眼人, 听觉线索均可以诱发对熟悉物体形状的心理表象。同时, 视觉表象的生动性评分与触觉形状选择性激活的右侧侧枕叶的个体差异水平存在显著相关^[59]。此外, 在完成物体识别或朝向辨别等触觉任务时, 视觉区域的激活并非反映它具有元通道特性, 而是可能反映了基于心理表象或是在触觉探索中产生的自上而下的调节过程^[58-59]。使用感官替代装置后, 盲人通过触觉也可以“看到”信息并激活初级视觉皮层, 这并非因为实际“看到”信息, 而是因为触觉信息激活了个体的视觉心理表象^[55]。

但是这一理论也受到了研究者的质疑。有研究发现, 视觉表象引起的侧枕叶激活显著小于触觉形状感知, 这表明视觉表象的作用相对次要^[60-61]。并且, 早期和晚期失明盲人均可以通过触摸^[60, 62-65]或感官替代装置^[66-67]产生的听觉信息引起形状选择相关的侧枕叶激活, 说明视觉表象可能无法解释视觉皮层的跨通道激活。不过, 由于视觉剥夺可能导致初级视觉皮层的跨通道可塑性, 这一结果也无法排除视觉表象对视力正常者跨通道迁移的作用^[62, 65]。

2.3 小结

多通道假说和多通道心理表象的相关研究加深了对支持跨通道迁移的表征类型的理解。两种理论均强调了表征在跨通道迁移过程中的重要作用。但是, 两者在何种表征类型支持跨通道迁移这一问题上存在不同观点。多通道假说强调个体不仅具有整合不同物体或事物的通道特异性表征的能力, 还具有生成通道通用性表征的能力, 这种多通道表征是使得信息可以发生跨通道迁移的主要原因。而多通

道心理表象理论则强调心理表象作为一种信息表征的方式,一方面可以直接影响个体对事物的感知,另一方面可以诱发与其相对应的其他通道的心理表象,从而促进了跨通道迁移的产生。目前已有研究者尝试整合这两种理论,提出一个概念模型,试图根据对物体的熟悉程度来调节自上而下或自下而上的加工,以此来协调心理表象和多通道整合在多通道物体表征中的作用^[68]。但是,这一理论模型还缺乏实证证据的支持,其所涉及的神经机制也还有待于未来研究的进一步证实。

3 跨通道迁移的神经机制及相关理论

爱尔兰哲学家 William Molyneux 在 1688 年曾提出一个经典问题^[69]:先天失明患者通过后天治疗恢复视力后,是否能够仅凭视觉区分先前通过触觉习得的物体形状?换句话说,仅通过触觉与世界交互是否可以发展出适当的视觉物体识别的神经基础?这个问题是跨通道迁移领域争论的一个焦点问题^[70],即跨通道迁移是先天存在的还是后天发展的?有研究者认为,跨通道迁移依赖于大脑中存在非通道特异的脑区,这些脑区是产生抽象的、具有通道通用性表征的基础,强调跨通道迁移是先天具有的能力。但也有研究者认为,后天发展或经验对跨通道迁移具有重要影响^[71],较为强调跨通道迁移能力是后天发展而来的。

3.1 元通道假说

为探索跨通道迁移产生的脑机制,借助脑成像技术,很多研究发现,大脑可能以元通道 (metamodal)^[70]或超通道 (supramodal)^[72]的组织方式表征事件,即依据加工物体的功能(如形状识别)或计算方式(如计算不同感觉输入的运动模式)激活特定脑区来表征信息^[73-74],具有任务通用性,且独立于刺激的感觉通道^[46, 70]。这种非感觉特异性的加工特性和反应方式^[72, 75-77],意味着大脑处理和加工信息的关键并不在于刺激的感觉通道,而在于脑区的具体功能及从相关感觉通道中提取可用信息的方式^[70, 78]。

根据这一理论,大脑为了更好地完成特定加工任务,会在神经网络群间相互竞争,并根据不同的结构特性形成大脑区域的功能特异化。以视觉为例,因某脑区具有分辨空间信息的功能,与视觉加工需求相契合,因此该区域被视作初级视觉皮层,负责加工视觉信息。但是,视觉信息作为主导输入模式,掩盖了该皮层可加工其他感觉通道信息的事

实。例如,有关感觉障碍或缺陷的研究发现,从未有过视觉经验或是记忆的先天性视障患者,在视觉区域表现出功能或任务特异性的跨通道激活模式^[46, 67, 79-81]。而且,对视力正常个体进行视觉剥夺后,视觉初级皮层将会发生神经可塑性改变并进行显著的功能重组 (recruited),枕叶皮层也将参与处理触觉和听觉等非视觉信息^[78],且加工视觉类别的大脑区域仍具有反应选择性^[72]。

研究还发现,负责视觉物体识别的腹侧通路^[44, 80],表现出不依赖于感觉通道的任务特异性激活^[46, 63]。例如,侧枕叶视-触区是一个由形状信息驱动的多感觉选择性功能网络,该区域仅在识别形状信息时有显著激活^[64]。腹侧通路还参与不同概念的类别表征等抽象属性的加工。例如,盲人在加工生命体与非生命体的听觉类别信息时,在枕-颞皮层腹侧通路中部至偏侧的偏移性激活模式与明眼人一致^[81]。而且,负责加工空间定位^[74, 80]和运动控制^[79]的背侧通路,也表现出了一定的通道独立性。例如,右侧楔叶和右侧枕中回在加工听觉空间信息时表现出显著激活^[74],顶内沟参与物体识别和物体定位^[68]。空间关系的多种感觉输入在顶叶后部皮层汇聚,并整合为用于指导连贯动作的空间表征^[82]。此外,言语区域也被认为是面向任务且通道独立的,且一些语言原则是抽象且具有元通道特性的^[83]。对使用手语的听障者的研究表明,尽管口语和手语由不同感觉通道调节,但是在加工特定语言信息时,听障和正常人群间具有相似的激活模式^[84-85],且听障者因左半球损伤而产生的手语失语与因韦尼克区和布洛卡区损伤导致的口语失语症状相似^[84]。

为了探讨元通道理论还是多通道心理表象理论更能解释跨通道迁移现象,一项 fMRI 研究发现^[73],触觉感知任务激活了侧枕叶中负责视觉物体加工的选择性区域,而触觉想象任务则在左侧的视觉物体选择性反应区有微弱的激活,但是对右侧的反应区没有影响。这说明跨通道刺激输入可以激活传统上被认为具有特异性的视觉皮层,支持元通道脑区功能信息加工是大脑加工信息的一个基本原则。

但是,也有部分研究发现与元通道理论不一致。例如,有研究发现,视障者恢复视力后并不能立即将触觉习得的物体分类知识迁移至视觉通道^[86],早期视障者并没有表现出经典的音高-形状的跨通道对应^[87-88],并且使用视觉表象会有助于

表现出“Bouba-Kiki”效应^[87]。因此, 需要清楚地认识到, 仅依靠大脑先天具有的元通道加工特性无法解释全部的跨通道迁移现象, 尤其是生物体所具有的跨通道整合信息的能力, 会使得个体在生长发育过程中不断形成新的跨通道联结, 未来研究应更加关注后天学习和经验如何与大脑先天具有的元通道加工特性相互作用, 从而促进了跨通道迁移的产生。

3.2 多通道逆层次理论

为了解释知觉学习中有关跨通道迁移的一些相互矛盾的研究结果^[77]。有研究者提出逆层次理论(the reverse hierarchy theory)。该理论认为, 任务的困难程度和特性决定了所需注意机制的皮层加工水平^[89]。具体而言, 对相对困难或是如类别等抽象信息进行知觉学习时, 通过自上而下的机制, 注意资源将被分配到类似外侧顶叶内区等具有较大接受域的更高水平的皮层关联区域, 此时任务加工主要涉及较高层级区域; 随着加工的深入, 与任务相关的信息(如朝向或是颜色)受到更为精细的加工, 将信息加工和注意力资源分配到较低的、初级感觉区域, 如接受域较小的初级视觉皮层(primary visual cortex, V1), 较低水平区域的反馈联结进而参与加工。当知觉学习涉及高阶脑区, 则学习可以泛化到其他感觉通道和特征; 但是当知觉学习发生在低级脑区, 其学习效果将被局限在学习刺激的特定位置和感觉通道^[90-91]。

随后, 研究者结合元通道理论对其进行了扩展并提出了多通道逆皮层理论^[92], 认为多通道知觉学习应该根据任务所需的认知水平和大脑处理信息的计算类型或特定功能进行定义^[93]。根据这一假说, 复杂的多通道知觉加工任务将涉及高级和低级信息加工脑区, 而相对容易的多通道加工任务则主要激活高级加工脑区^[90]; 相比于单通道任务, 多通道加工会激活更广泛的大脑区域, 尤其是高级多通道脑区, 因而会有利于学习的迁移和泛化^[94]。

但是, 统计学习的部分研究结果与这一预测相反。统计学习被认为是信息加工理论的重要组成部分, 主要考察个体提取时间和空间中刺激流内在规律的能力^[95]。采用经典的人工语法学习(artificial grammar learning)任务发现, 习得的序列规则可以从一个刺激集迁移至另一个刺激集, 这支持了统计学习具有独立于刺激的输入通道或知觉特征的抽象表征。但是, 也有研究发现, 对于来自不同感知维度或通道的多个刺激流, 个体可以独立或并行地

习得序列知识, 这很大程度上支持统计学习具有刺激特异性且通道依赖的表征^[96]。此外, 采用多通道刺激的人工语法学习研究也发现, 即使存在跨通道迁移, 其迁移效果也是有限的^[97]。例如, 当刺激来自不同的知觉维度(如颜色和形状)时, 被试能够在视觉域中同时学习两种不同的人工语法, 而当刺激来自相同的知觉维度时则不能, 甚至学习会导致刺激特异性知识^[97]。这些研究表明, 在学习分布信息时存在独立的通道约束, 使得学习指向通道特异性甚至刺激特异性表征, 这与视知觉学习的效果类似。因此, 对于统计学习中所展示的泛化现象, 有研究者认为是由局部刺激属性和整体相似性判断驱动, 而不是抽象规则的提取。有关这一问题还有待于进一步探讨。

3.3 小结

元通道或超通道理论认为, 大脑中存在非通道特异性脑区, 负责加工不同感觉信息所共同拥有的某种功能或概念, 强调跨通道迁移的产生依赖于大脑固有的神经结构, 它们是产生抽象的、具有通道通用性表征的基础。其优点在于明确了大脑可以进行跨通道迁移的神经基础, 认为跨通道迁移能力是基于大脑结构而先天存在的。但是, 这一理论忽视了大脑的可塑性, 即多通道表征会在个体发展发育过程中不断更新和发展。而多通道逆层次理论则是在元通道理论的基础上, 强调后天发展或经验对通道通用性表征形成的影响^[71], 解释说明了经过跨通道整合后进行跨通道迁移的一些特殊现象。不过, 需要注意的是, 虽然每种理论的提出依据和侧重点有所不同, 但是在跨通道迁移的产生和发展过程中, 不同理论有时是相辅相成的, 在未来的研究中, 有必要整合现有的理论, 提出更具解释力的理论来阐释跨通道迁移现象。

4 跨通道迁移的影响因素

研究发现, 跨通道迁移的产生会受到通道优势、年龄或成熟发育和感官经验等的制约, 而学习任务 and 刺激材料的不同类型则会影响跨通道迁移的效应大小。考察跨通道迁移的影响因素, 不仅有助于阐明跨通道迁移在什么条件下发生, 以及如何提高跨通道迁移的效果, 还可以为跨通道迁移的产生机制和理论提供支持证据(表1)。例如, 通道优势现象支持强调跨通道迁移基于先天存在的大脑结构的元通道理论, 而年龄等因素的影响则更支持跨通道迁移是后天发展的多通道假说等理论。

4.1 通道优势

通道优势是指信息可以从优势加工感觉通道迁移到非优势通道，但不能从非优势通道迁移到优势通道，即通道间信息的迁移存在不对称性 (asymmetry) [40, 98-100]。例如，空间任务的绩效改善可以从视觉通道迁移到听觉通道，但不能从听觉通道迁移到视觉通道；相反，时间任务绩效的改善可以从听觉通道迁移到视觉通道，但不能从视觉通道迁移到听觉通道 [34]。同时，单维度类别知识也被发现在视-听通道间进行迁移时存在不对称性 [100-101]。这种通道优势支持元通道假说，并对多通道加工模型和可塑性提出了重要的限制。

有研究者认为，通道优势可能是受到感觉通道加工任务或信息准确性的影响 [102]。研究发现，阈上信息的多通道整合遵循贝叶斯加工模型 [93]，即根据不同感觉通道的相对可靠性对输入信息进行加权后再进行线性求和。这可能是由于大脑加工信息时存在跨通道的感觉校准 [103]，给定任务所涉及的最准确的感觉通道可以校准另一通道的信息。也就是说，优势通道的绩效改善可以引起其他通道的连锁反应，但非优势通道的任务训练却只会导致通道特异的学习效应。

也有研究发现，即使视觉通道比听觉通道在辨别运动方向时更为精准，声音运动信息仍然可以促进视觉运动方向的知觉学习 [104]，这一结果似乎对迁移效应基于感觉通道加工精度的解释提出了质疑。因此，有研究者提出另一种解释，认为不论信息通过哪种通道表征，单通道输入信息均由与任务相关的感觉系统加工 [105]。例如，听觉皮层可以对来自多种感觉通道的的时间信息进行编码，大脑会将视觉输入自动转换为听觉表征 [34, 75]。据此，当通过一种感觉通道训练某一概念的超通道表征时，其准确度的提高也会改善其他通道的绩效，即使训练通道的加工精度比迁移通道差。

4.2 感官经验

跨模态迁移依赖感官经验或跨感觉间校准 (cross-sensory calibration)，跨通道迁移的失败可能与来自多种感官的信息最初在格式上不匹配有关 [15, 105-106]。一项研究考察了5位成年先天视障患者单只眼睛手术恢复视力48 h后完成物体匹配任务的绩效 [86]。结果发现，经过2 d的训练后，患者可以在单通道内 (视觉-视觉、触觉-触觉) 完成匹配任务，但是不能在跨通道任务中将学习的触觉物体与视觉物品匹配。不过，值得注意的是，即使未再

进行训练，在测试1周后其中3名患者成功完成对新异物体的跨通道匹配，说明跨通道迁移需要足够时间以校准视觉和触觉两种感觉系统。有研究者对此提出质疑 [107]，认为未能成功跨通道迁移的原因可能是由于不同感觉通道内感知的信息存在差异。如在触觉条件下，允许患者用手触摸物体，但是在视觉条件下却未能从不同角度观察物体。

此外，有研究发现，因患有双侧脑室周围白质软化 (bilateral periventricular leukomalacia) 而导致运动和视觉障碍的儿童在单通道物体识别方面存在障碍，但是跨通道感觉校准有利于其完成视觉-触觉识别任务，使其将触觉信息迁移至视觉并影响视觉信息判断 [108]。另有动物研究也发现，黄蜂可以分别习得花朵的视觉和温度模式 (pattern)，但是习得的视觉和温度模式间无法发生跨通道迁移 [109]，表明跨通道迁移的发生与先前的感知经验相关，当两种感觉通道在先前加工未发生交互时，则跨通道迁移较难发生。

4.3 年龄或成熟

年龄或发育成熟也是影响跨通道迁移的重要因素 [110]。虽然侧枕叶已被证实参与早期视觉-触觉识别，但是相比于单通道识别，跨通道识别的发展似乎需要更长时间 [111]，且早期视觉经验的缺乏将影响个体视-触通道迁移能力 [9]。研究发现，尽管8岁及以上的儿童与成人一样以统计最优的模式整合视觉和触觉信息，但儿童在8岁以前的视觉-触觉加工能力还没有成熟，此时会根据任务性质的不同，表现出一种感觉支配另一种感觉的加工模式 [111]。例如，在大小识别任务中，触觉信息在高度和阈值的判断中起主导作用；但在方向识别任务中，视觉信息的作用则更为突出 [103]。

此外，一项事件相关电位 (event related potential, ERP) 研究发现，虽然7个月大的婴儿可以感觉到听觉和视觉信息，但是却无法整合视听信息以表征人类行为 [112]。并且，一项对典型发育学龄儿童的视觉-触觉物体识别研究也发现，尽管4~5岁的儿童已经发展出这种能力，但是物体识别所需要的视觉-触觉加工通常会在整个小学阶段持续发展 [113]。一项研究考察双侧脑室周围白质软化儿童和典型发育儿童在视觉、触觉和视觉-触觉3种条件下的物体识别能力的研究 [108] 发现，即使3种条件下双侧脑室周围白质软化儿童的判断绩效均显著差于对照组，但是在小学三年级前双侧脑室周围白质软化儿童的跨通道物体识别能力表现出随年

龄而发展的趋势, 支持早期视觉-触觉校准和神经发育成熟对整个生命周期内物体识别的正常发展至关重要。

因此, 有研究者认为, 多通道表征需要基于单通道表征间统计相关性建立且发展缓慢, 这一假设也得到神经科学证据的支持。例如, 研究发现, 上丘需要感觉经验的参与才可以形成多通道整合的能力^[114-116], 新生猴子和猫上丘的部分神经元可以对多种感觉通道信号进行反应, 但直到生命后期这些神经元才可以整合并形成事件的多通道表征^[117], 并且, 当缺乏跨通道组合经验时, 将无法整合多通道信息^[118]。

4.4 学习任务设置

除个体因素外, 学习任务的设置也是影响跨通道迁移的重要因素^[119-120]。例如, 问题解决的类比迁移训练^[121-122]、基于比较的训练^[123]、良好的提问策略^[124]、足够的知觉训练时程、较低的工作记忆负荷^[8]以及间隔训练或双任务训练方式^[125-127]等都有助于学习者将习得的知识进行跨通道迁移。

不过, 关于知觉训练时程设置的研究结果并不一致。一方面, 有研究发现必须进行较长时间的知觉学习才能得到较好的迁移效果^[128-129]。研究发现, 虽然延长训练后的巩固时间, 无论较短还是较长均有助于更好的迁移效果, 但是较长的巩固时间或是慢波睡眠更有利于迁移^[130-131], 如巩固时间为24 h的被试听对视的迁移好于巩固时间为5 min的被试^[35]。另一方面, 有研究发现, 相对较短的训练时间(15 min)也足以发生跨通道迁移。因此, 有研究者提出, 知觉学习的时间进程可能分为两个阶段: 一个是发生在训练过程内的快速改善阶段^[33]; 另一个则是发生在12 h以上的任务巩固阶段, 知觉提升相对缓慢^[132]。

双任务训练要求学习者同时完成超过两个刺激维度的任务, 有利于提高知觉学习在不同刺激维度间的迁移效应^[30, 133]。例如, 尽管对比度的知觉学习改善通常局限于受训的视网膜区域, 但是当学习者在另一位置同时完成如朝向识别任务时, 对比度识别绩效的改善可以发生迁移^[134], 并且, 在未训练视野区进行预实验也有利于学习绩效的迁移^[135]。跨通道迁移研究领域也发现了类似的现象。例如, 要求被试同时完成触觉朝向知觉学习和对比度辨别知觉学习任务, 结果发现, 被认为具有刺激特异性的朝向知觉学习可以从触觉迁移至视觉^[102]。研究者认为, 触觉朝向迁移特异于学习刺

激的主要原因是, 在进行知觉学习的过程中视觉信息并没有被激活。在双任务知觉学习过程中, 虽然个体没有进行视觉朝向训练, 但是对比度辨别任务会将朝向信息的多通道表征与未训练的视觉通道联系在一起, 从而实现跨通道迁移。

4.5 刺激特征

在学习过程中所使用的刺激特征也会影响跨通道迁移效应。例如, 学习集与测试集之间的相似性较高^[136], 将有利于在跨通道信息间进行迁移。最为典型的例子是当刺激材料间具有跨通道对应时, 个体更容易发生信息的跨通道迁移^[137]。跨通道对应是用来形容看似不相关的感觉通道的刺激、属性或维度之间所表现出的系统关联现象^[138], 例如, 音调较高(低)的听觉刺激更倾向于与明度较亮(暗)的^[139]、空间位置较高(低)的^[140]、尺寸较小(大)的^[141]视觉刺激匹配。当刺激具有跨通道对应时, 重复暴露某一通道信息, 会使得个体对另一通道信息的感知判断受到影响, 发生信息的跨通道迁移。例如, 有研究使用想象消费范式^[142], 发现食物或饮料的视觉和味觉特征间具有颜色-味道跨通道对应, 当个体在短时间内重复暴露于某种食物或饮料的某一通道信息时, 会降低其对另一通道的评价(如要求被试重复接触或想象饮料的颜色, 会降低其对饮料口味的评价), 这一现象被称为感官特异性饱腹感(sensory-specific satiety)。

此外, 学习集和测试集间共享某些特定的时空特征^[143]、学习集的结构或元素间具有重复模式^[144]有利于信息的跨通道迁移。但也有研究发现, 在学习过程中不断呈现新异刺激以提高刺激的变异性时, 虽然高变异性刺激影响了知觉学习绩效, 但是更有利于跨通道迁移^[27]。这可能是由于学习刺激集的变异性越大或者说包含的样例种类越丰富, 将使得个体避免采用特异于学习刺激的策略, 从而更有利于跨通道迁移。

4.6 获得知识的意识性

研究者对于获得知识的意识性对跨通道迁移效应的影响持有不同的观点。一方面, 有研究者认为, 外显的、陈述性知识是跨通道迁移的必要条件, 只有给学习者提供明确指导语时^[124]才能发生跨通道迁移。另一方面, 有研究者则认为, 无意识习得的抽象结构知识, 即使在人们没有意识到新问题与先前学习存在联系时, 仍可自发地进行迁移, 影响人们在新情境下的行为^[144]。

针对以上争议, 在类别学习研究领域, 有研究

者提出言语和内隐系统的竞争 (competition between verbal and implicit systems, COVIS) 理论^[145-146], 对不同类别学习的迁移效果进行预测认为: 基于规则 (rule-based, RB) 的外显类别学习具有抽象性, 个体很容易用语言表达其类别界限规则, 虽在学习时需要大量使用工作记忆和执行控制功能, 但不依赖于学习背景, 因而能够较好地进行迁移^[147]; 与之相反, 内隐的、基于信息整合 (information-integration, II) 的类别学习则需要结合不同维度的信息来进行, 学习依赖于程序性加工, 受限于原始的、学习过的刺激空间, 因而迁移效果较差, 甚至无法迁移^[148]。已有研究为这一理论提供了支持证据, 研究发现, 在单维度的RB学习条件下可以发生迁移, 但是II条件下则存在不一致的研究发现。考虑到两种任务之间类别结构的难度差异^[149-150]可能对这一结果产生影响, 有研究者采用了更复杂的双维度RB类别规则, 结果发现, 无论是RB还是II类别结构, 均没有出现跨通道迁移效应^[22]。

除类别学习外, 内隐听觉序列学习知识也被发现无法迁移至视觉通道^[151]。此外, 有研究考察了

短学习时程如何影响内隐和外显时间知觉训练绩效的跨通道迁移^[33], 结果发现, 外显听觉和触觉时长辨别训练提高了视觉时间辨别精度, 但是并没有观察到内隐学习导致的跨通道迁移。由于在外显训练任务中, 被试需要对连续呈现的两个刺激的呈现时长做出知觉判断, 而在内隐训练任务中并不要求被试完成时间辨别, 因此, 有研究者认为内隐和外显训练中不同的跨通道迁移效应可能与注意相关。也有研究进一步发现, 增加训练量并没有观察到知觉绩效改变, 但是巩固时间 (24 h) 有利于内隐训练发生跨通道迁移^[152]。一项元分析研究还发现, 内隐和外显时间知觉激活的神经环路存在差异^[153], 这一结果表明不同的神经基础可能是制约内隐时间知觉训练绩效的原因。但是目前关于内隐时间知觉训练的研究还较少, 有待于进一步探索。

除以上因素外, 研究还发现自我效能^[154]、学习策略 (如个体进行类别学习时, 基于规则或基于样例的不同倾向)^[155]和任务预期^[156]等个体差异也可能影响迁移的效果。但这些个体差异对通道迁移的影响的研究还较少, 相关研究发现和结论还是探索性的, 需要未来研究的进一步证实。

Table 1 The factors that influence crossmodal transfer and the theories they support

表1 影响跨通道迁移的因素及支持理论

影响因素	类型	原因	支持证据	支持理论
通道优势	客观因素	受先天存在的大脑结构的限制	空间任务的绩效改善可以从视觉通道迁移到听觉通道, 但不能从听觉通道迁移到视觉通道; 相反, 时间任务绩效的改善可以从听觉通道迁移到视觉通道, 但不能从视觉通道迁移到听觉通道 ^[40, 98-100]	元通道或超通道理论
感官经验	客观因素	受后天经验的影响	视障者因缺乏视觉-触觉匹配经验, 即使恢复视力, 视觉和触觉信息间也无法发生跨通道迁移 ^[86]	多通道表征、多通道心理表象理论
年龄或成熟	客观因素	受年龄的限制	8岁以下的儿童视觉-触觉加工能力还没有成熟 ^[103] , 但8岁及以上的儿童具有与成人一样的能力, 以统计最优的模式整合视觉和触觉信息并形成多通道表征	多通道表征、多通道心理表象理论
学习任务设置	客观因素	受学习任务的限制	问题解决的类比迁移训练 ^[121-122] 、基于比较的训练 ^[123] 、良好的提问策略 ^[124] 、足够的知觉训练时程、较低的工作记忆负荷 ^[8] 以及间隔训练或双任务训练方式 ^[125-127] 等都有助于学习者将习得的知识进行跨通道迁移	多通道表征、多通道逆皮层理论
刺激特征	客观因素	受学习刺激的限制	学习集与测试集之间的相似性较高 ^[136] 、共享某些特定的时空特征 ^[143] , 及学习时刺激变异度高 ^[27] 均有利于信息的跨通道迁移	多通道表征、多通道逆皮层理论
获得知识的意识	主观因素	受主观意识的影响	只有给学习者提供明确指导语时才能发生跨通道迁移 ^[124]	

5 总结与展望

学习时间和精力有限性决定了迁移的重要性, 而人类具有的多通道信息加工能力则决定了跨通道迁移的重要性。目前, 已有越来越多的研究在

不同领域对跨通道迁移效应进行了深入探索, 初步揭示了跨通道迁移的表征类型、神经机制和影响因素, 深化了人们对于跨物种和跨生命周期的跨通道迁移现象的理解。不过, 需要指出的是, 目前有关跨通道迁移的研究尚处于起步阶段, 对跨通道迁移

所依赖的表征类型和神经机制还存在着相互矛盾的理论观点和研究发现,对促进跨通道迁移的影响因素也还存在着不一致的理论解释和研究结果。未来研究不仅要结合跨通道迁移的影响因素来进一步揭示跨通道迁移的认知神经机制,还需要从应用的角度阐述跨通道迁移的相关研究发现对人工智能领域的学习算法和感官障碍的康复训练的启示及潜在应用。

首先,未来需要扩展跨通道迁移的研究范围,进一步考察不同研究领域跨通道迁移产生的认知机制。例如,在时间知觉研究中存在的一个争议问题,即对于事件的时间感知是否由一个中央集中的、通道通用的时间调节机制控制,还是存在多个通道特异性时间加工系统?目前尚存在相互矛盾的研究结果,分别支持不同的理论假说:有关时间知觉训练绩效可以发生跨通道迁移的结果,支持存在一个统一的、超通道的“中央时钟”机制^[30];但有关时间知觉训练仅局限于训练通道知觉改善的结果,则支持存在一个不同感觉通道特异的分布式时间加工系统。此外,目前对于跨通道迁移的研究多数集中于近迁移效应。近迁移效应指将所学的知识应用到与获得知识的表面特征不同,但是结构特征相似的情景中。例如,将习得的物体识别或分类知识从听觉通道迁移至视觉通道。虽然有研究使用听觉任务转换范式(task-switching paradigm)发现,在听觉训练中提高的任务转换能力,可以迁移至视觉通道^[157],并且这一迁移效应不受年龄或认知老化等因素的影响^[158-159]。但是,关于知识是否可以在表面特征和结构特征都不相似的情景间发生跨通道迁移,即跨通道远迁移效应的探索研究还比较少。在未来的研究中,应进一步明确认知训练是否可以改善因衰老或其他认知障碍所带来的执行控制功能的衰退,以及认知训练带来的改善是否可以迁移至一般认知能力^[160-161]。毕竟迁移研究的最初期望是获得更为一般性和普遍性的迁移效应。

其次,未来的研究需要进一步考察跨通道迁移的影响因素,以便更好地揭示产生跨通道迁移的原因和神经机制。例如,跨通道对应作为跨通道迁移的影响因素,不仅有助于个体将信息进行跨通道迁移,同时感觉障碍或感觉剥夺被试的跨通道对应倾向,也是研究跨通道迁移神经机制的突破口。例如,有研究发现^[162],虽然视障者仍表现出音高-大小和音高-重量的跨通道对应,甚至发展出区别于典型发展人群的音高-纹理对应和音高-粗糙度对

应,但是并没有表现出经典的音高-形状对应。这一结果不仅说明了视觉表象和视觉经验在跨通道迁移中的作用,还表明典型发展人群不是基于大脑的通道通用性表征发展出音高-形状对应。

最后,未来应进一步加强跨通道迁移的机制研究与人工智能的学习算法等的跨学科交叉与融合。人工智能领域中对迁移的考察重点在于,明确训练数据与方法中哪些知识具有通用性、可以跨领域或者跨任务进行迁移,并利用通用性知识提升目标任务的性能,这与人类迁移的研究目的相契合。未来研究一方面可通过人工智能领域的迁移学习进行模型模拟,验证人类跨通道迁移的相关理论,另一方面也可将人类跨通道迁移的相关研究成果应用于发展新的学习模型和算法,使人工智能的产品可以像人类一样“举一反三”和“触类旁通”。同时,大脑跨通道迁移的神经可塑性研究成果可以应用于训练康复等实际问题^[163]。例如,在考察视觉对听觉感觉替代泛化的广度时发现,视觉到听觉的迁移训练在第一周就会发生泛化,并且会显著受到刺激复杂性的影响^[164]。同时研究还发现,使用触觉反馈可以形成形状的听觉替代表征,且从接受训练的(触觉或听觉)通道中形成抽象信息,可以迁移到未经过训练的视觉通道^[165]。未来需要进一步厘清跨通道迁移过程中不同脑区的可塑性变化模式,将其潜在结果应用于感官替代装置,或者为感官受损人群提供更好的技术以减轻感官障碍,并通过训练改善其感官受损情况。

参 考 文 献

- [1] Yildirim I, Jacobs R A. Transfer of object category knowledge across visual and haptic modalities: experimental and computational studies. *Cognition*, 2013, **126**(2): 135-148
- [2] 杨卫星,张梅玲. 迁移研究的发展与趋势. *心理学动态*, 2000, **8**(1): 46-53
Yang W X, Zhang M L. *J Dev Psychol*, 2000, **8**(1): 46-53
- [3] Beesley T, Wills A J, Le Pelley M E. Syntactic transfer in artificial grammar learning. *Psychon Bull Rev*, 2010, **17**(1): 122-128
- [4] Xin G, Liu Y. The mechanism of transfer effect in artificial grammar learning. *Psychol Sci*, 2009, **32**(1): 245-247
- [5] Von Der Emde G, De Perera T B. Cross-modal sensory transfer: bumble bees do it. *Science*, 2020, **367**(6480): 850-851
- [6] Lacey S, Peters A, Sathian K. Cross-modal object recognition is viewpoint-independent. *PLoS One*, 2007, **2**(9): e890
- [7] Lawson R. A comparison of the effects of depth rotation on visual and haptic three-dimensional object recognition. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2009, **35**(4): 911-930
- [8] Balani A B. Cross-modal information transfer and the effect of

- concurrent task-load. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2020, **46**(1): 104-116
- [9] Purpura G, Del Magro E F, Caputo R, *et al.* Visuo-haptic transfer for object recognition in children with peripheral visual impairment. *Vision Res*, 2021, **178**: 12-17
- [10] Schneider TR, Engel AK, Debener S. Multisensory identification of natural objects in a two-way crossmodal priming paradigm. *Exp Psychol*, 2008, **55**(2): 121-132
- [11] Cloke J M, Jacklin D L, Winters B D. The neural bases of crossmodal object recognition in non-human primates and rodents: a review. *Behav Brain Res*, 2015, **285**: 118-130
- [12] Proops L, McComb K, Reby D. Cross-modal individual recognition in domestic horses (*Equus caballus*). *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, **106**(3): 947-951
- [13] Evans T A, Howell S, Westergaard G C. Auditory-visual cross-modal perception of communicative stimuli in tufted capuchin monkeys (*Cebus apella*). *J Exp Psychol Anim Behav Process*, 2005, **31**(4): 399-406
- [14] Solvi C, Al-Khudhairy S G, Chittka L. Bumble bees display cross-modal object recognition between visual and tactile senses. *Science*, 2020, **367**(6480): 910-912
- [15] Kawashima S, Yasumuro H, Ikeda Y. Plain-body octopus's (*Callistoctopus aspilosomatis*) learning about objects *via* both visual and tactile sensory inputs: a pilot study. *Zool Sci*, 2021, **38**(5): 383-396
- [16] Carducci P, Squillace V, Manzi G, *et al.* Touch improves visual discrimination of object features in capuchin monkeys (*Sapajus* spp.). *Behav Processes*, 2020, **172**: 104044
- [17] Schumacher S, De Perera T B, Thenert J, *et al.* Cross-modal object recognition and dynamic weighting of sensory inputs in a fish. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, **113**(27): 7638-7643
- [18] Zeymer M, Von Der Emde G, Wullimann M F. The mormyrid optic tectum is a topographic interface for active electrolocation and visual sensing. *Front Neuroanat*, 2018, **12**: 12: 79
- [19] Wallraven C, Buelthoff H H, Waterkamp S, *et al.* The eyes grasp, the hands see: metric category knowledge transfers between vision and touch. *Psychon Bull Rev*, 2014, **21**(4): 976-985
- [20] O'callaghan G, O'dowd A, Simoes-Franklin C, *et al.* Tactile-to-visual cross-modal transfer of texture categorisation following training: an fMRI study. *Front Integr Neurosci*, 2018, **12**: 12-24
- [21] Weise C, Ortiz C C, Tibbetts E A. Paper wasps form abstract concept of 'same and different'. *Proc Biol Sci*, 2022, **289**(1979): 20221156
- [22] Edmunds C E R, Inkster A B, Jones P M, *et al.* Absence of cross-modality analogical transfer in perceptual categorization. *Open J Exp Psychol Neurosci*, 2020, **1**: 3-13
- [23] Sun X, Yao L, Fu Q, *et al.* Multisensory transfer effects in implicit and explicit category learning. *Psychol Res*, 2023, **87**(5): 1353-1369
- [24] Lengyel G, Fiser J. The relationship between initial threshold, learning, and generalization in perceptual learning. *J Vision*, 2019, **19**(4): 28
- [25] Reetzke R, Xie Z, Llanos F, *et al.* Tracing the trajectory of sensory plasticity across different stages of speech learning in adulthood. *Curr Biol*, 2018, **28**(9): 1419-1427
- [26] Tan Q, Wang Z, Sasaki Y, *et al.* Category-induced transfer of visual perceptual learning. *Curr Biol*, 2019, **29**(8): 1374-1378
- [27] Hussain Z, Bennett P J, Sekuler A B. Versatile perceptual learning of textures after variable exposures. *Vision Res*, 2012, **61**: 89-94
- [28] Xiong Y Z, Zhang J Y, Yu C. Bottom-up and top-down influences at untrained conditions determine perceptual learning specificity and transfer. *Elife*, 2016, **5**: e14614
- [29] Bueti D, Buonomano D V. Temporal perceptual learning. *Timing Time Percept*, 2014, **2**(3): 261-289
- [30] Xiong Y Z, Guan S C, Yu C. A supramodal and conceptual representation of subsecond time revealed with perceptual learning of temporal interval discrimination. *Sci Rep*, 2022, **12**(1): 10668
- [31] Meegan D V, Aslin R N, Jacobs R A. Motor timing learned without motor training. *Nat Neurosci*, 2000, **3**(9): 860-862
- [32] Stevenson R A, Wilson M M, Powers A R, *et al.* The effects of visual training on multisensory temporal processing. *Exp Brain Res*, 2013, **225**(4): 479-489
- [33] Chen L, Zhou X. Fast transfer of crossmodal time interval training. *Exp Brain Res*, 2014, **232**(6): 1855-1864
- [34] Bratzke D, Seifried T, Ulrich R. Perceptual learning in temporal discrimination: asymmetric cross-modal transfer from audition to vision. *Exp Brain Res*, 2012, **221**(2): 205-210
- [35] Bratzke D, Schroter H, Ulrich R. The role of consolidation for perceptual learning in temporal discrimination within and across modalities. *Acta Psychol*, 2014, **147**: 75-79
- [36] Bueti D, Lasaponara S, Cercignani M, *et al.* Learning about time: plastic changes and interindividual brain differences. *Neuron*, 2012, **75**(4): 725-737
- [37] Merchant H, Zarco W, Prado L. Do we have a common mechanism for measuring time in the hundreds of millisecond range? Evidence from multiple-interval timing tasks. *J Neurophysiol*, 2008, **99**(2): 939-949
- [38] Lapid E, Ulrich R, Rammsayer T. Perceptual learning in auditory temporal discrimination: no evidence for a cross-modal transfer to the visual modality. *Psychon Bull Rev*, 2009, **16**(2): 382-389
- [39] Vibell J, Lim A, Sinnett S. Temporal perception and attention in trained musicians. *Music Percept*, 2021, **38**(3): 293-312
- [40] Alais D, Cass J. Multisensory perceptual learning of temporal order: audiovisual learning transfers to vision but not audition. *PLoS One*, 2010, **5**(6): e11283
- [41] Frost R, Armstrong B C, Siegelman N, *et al.* Domain generality versus modality specificity: the paradox of statistical learning. *Trends Cogn Sci*, 2015, **19**(3): 117-125
- [42] Erdogan G, Yildirim I, Jacobs R A. From sensory signals to modality-independent conceptual representations: a probabilistic language of thought approach. *PLoS Comput Biol*, 2015, **11**(11): 32
- [43] Yildirim I, Jacobs R A. A rational analysis of the acquisition of

- multisensory representations. *Cogn Sci*, 2012, **36**(2): 305-332
- [44] Erdogan G, Chen Q, Garcea F E, *et al.* Multisensory part-based representations of objects in human lateral occipital cortex. *J Cogn Neurosci*, 2016, **28**(6): 869-881
- [45] Konkle T, Moore C I. What can crossmodal aftereffects reveal about neural representation and dynamics?. *Commun Integr Biol*, 2009, **2**(6): 479-481
- [46] Amedi A, Malach R, Hendler T, *et al.* Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nat Neurosci*, 2001, **4**(3): 324-330
- [47] James T W, Humphrey G K, Gati J S, *et al.* Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia*, 2002, **40**(10): 1706-1714
- [48] Zangenehpour S, Zatorre R J. Crossmodal recruitment of primary visual cortex following brief exposure to bimodal audiovisual stimuli. *Neuropsychologia*, 2010, **48**(2): 591-600
- [49] Quiroga R Q. Concept cells: the building blocks of declarative memory functions. *Nat Rev Neurosci*, 2012, **13**(8): 587-597
- [50] Quiroga R Q, Kraskov A, Koch C, *et al.* Explicit encoding of multimodal percepts by single neurons in the human brain. *Curr Biol*, 2009, **19**(15): 1308-1313
- [51] Green A M, Angelaki D E. Multisensory integration: resolving sensory ambiguities to build novel representations. *Curr Opin Neurobiol*, 2010, **20**(3): 353-360
- [52] Marks D E. I am conscious, therefore, I am: imagery, affect, action, and a general theory of behavior. *Brain Sci*, 2019, **9**(5): 27
- [53] Berger Christopher C, Ehrsson H H. Mental imagery changes multisensory perception. *Curr Biol*, 2013, **23**(14): 1367-1372
- [54] Nanay B. Multimodal mental imagery. *Cortex*, 2018, **105**: 125-134
- [55] Nanay B. Sensory substitution and multimodal mental imagery. *Perception*, 2017, **46**(9): 1014-1026
- [56] Hertrich I, Dietrich S, Ackenmann H. Cross-modal interactions during perception of audiovisual speech and nonspeech signals: an fMRI study. *J Cogn Neurosci*, 2011, **23**(1): 221-237
- [57] Pekkola J, Ojanen V, Autti T, *et al.* Primary auditory cortex activation by visual speech: an fMRI study at 3T. *Neuroreport*, 2005, **16**(2): 125-128
- [58] Sathian K, Zangaladze A. Feeling with the mind's eye: the role of visual imagery in tactile perception. *Optom Vis Sci*, 2001, **78**(5): 276-281
- [59] Zhang M M, Weisser V D, Stilla R, *et al.* Multisensory cortical processing of object shape and its relation to mental imagery. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2004, **4**(2): 251-259
- [60] Amedi A, Raz N, Pianka P, *et al.* Early 'visual' cortex activation correlates with superior verbal memory performance in the blind. *Nat Neurosci*, 2003, **6**(7): 758-766
- [61] Reed C L, Shoham S, Halgren E. Neural substrates of tactile object recognition: an fMRI study. *Hum Brain Mapp*, 2004, **21**(4): 236-246
- [62] Pascual-Leone A, Amedi A, Fregni F, *et al.* The plastic human brain cortex. *Annu Rev Neurosci*, 2005, **28**: 377-401
- [63] Pietrini P, Furey M L, Ricciardi E, *et al.* Beyond sensory images: object-based representation in the human ventral pathway. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, **101**(15): 5658-5663
- [64] Stilla R, Sathian K. Selective visuo-haptic processing of shape and texture. *Hum Brain Mapp*, 2008, **29**(10): 1123-1138
- [65] Sathian K, Lacey S. Journeying beyond classical somatosensory cortex. *Can J Exp Psychol*, 2007, **61**(3): 254-264
- [66] Renier L, Collignon O, Poirier C, *et al.* Cross-modal activation of visual cortex during depth perception using auditory substitution of vision. *Neuroimage*, 2005, **26**(2): 573-580
- [67] Amedi A, Stern W M, Camprodon J A, *et al.* Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex. *Nat Neurosci*, 2007, **10**(6): 687-689
- [68] Lacey S, Tal N, Amedi A, *et al.* A putative model of multisensory object representation. *Brain Topogr*, 2009, **21**(3-4): 269-274
- [69] Levin J. Molyneux's question and the amodality of spatial experience. *Inquiry*, 2018, **61**(5-6): 590-610
- [70] Pascual-Leone A, Hamilton R. The metamodal organization of the brain. *Prog Brain Res*, 2001, **134**: 427-445
- [71] Miralles D, Garrofe G, Pares C, *et al.* Multi-modal self-adaptation during object recognition in an artificial cognitive system. *Sci Rep*, 2022, **12**(1): 3772
- [72] Ricciardi E, Pietrini P. New light from the dark: what blindness can teach us about brain function. *Curr Opin Neurol*, 2011, **24**(4): 357-363
- [73] Tal Z, Geva R, Amedi A. The origins of metamodality in visual object area LO: bodily topographical biases and increased functional connectivity to S1. *Neuroimage*, 2016, **127**: 363-375
- [74] Collignon O, Vandewalle G, Voss P, *et al.* Functional specialization for auditory-spatial processing in the occipital cortex of congenitally blind humans. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, **108**(11): 4435-4440
- [75] Kanai R, Lloyd H, Buetti D, *et al.* Modality-independent role of the primary auditory cortex in time estimation. *Exp Brain Res*, 2011, **209**(3): 465-471
- [76] Kupers R, Ptito M. Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, **41**: 36-52
- [77] Zilber N, Ciuciu P, Gramfort A, *et al.* Supramodal processing optimizes visual perceptual learning and plasticity. *Neuroimage*, 2014, **93**: 32-46
- [78] Bola L, Matuszewski J, Szczepanik M, *et al.* Functional hierarchy for tactile processing in the visual cortex of sighted adults. *Neuroimage*, 2019, **202**: 116084
- [79] Fiehler K, Burke M, Bien S, *et al.* The human dorsal action control system develops in the absence of vision. *Cereb Cortex*, 2009, **19**(1): 1-12
- [80] Striem-Amit E, Dakwar O, Reich L, *et al.* The large-scale organization of "visual" streams emerges without visual experience. *Cereb Cortex*, 2012, **22**(7): 1698-1709
- [81] Mahon B Z, Anzellotti S, Schwarzbach J, *et al.* Category-specific organization in the human brain does not require visual experience. *Neuron*, 2009, **63**(3): 397-405

- [82] Matteau I, Kupers R, Ricciardi E, *et al.* Beyond visual, aural and haptic movement perception: hMT plus is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals. *Brain Res Bull*, 2010, **82**(5-6): 264-270
- [83] Berent I, Bat-El O, Brentari D, *et al.* Knowledge of language transfers from speech to sign: evidence from doubling. *Cogn Sci*, 2020, **44**(1): e12809
- [84] Macsweeney M, Capek C M, Campbell R, *et al.* The signing brain: the neurobiology of sign language. *Trends Cogn Sci*, 2008, **12**(11): 432-440
- [85] Petitto L A, Zatorre R J, Gauna K, *et al.* Speech-like cerebral activity in profoundly deaf people processing signed languages: implications for the neural basis of human language. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, **97**(25): 13961-13966
- [86] Held R, Ostrovsky Y, Degelder B, *et al.* The newly sighted fail to match seen with felt. *Nat Neurosci*, 2011, **14**(9): 1217-1217
- [87] Fryer L, Freeman J, Pring L. Touching words is not enough: how visual experience influences haptic-auditory associations in the “Bouba-Kiki” effect. *Cognition*, 2014, **132**(2): 164-173
- [88] Hamilton-Fletcher G, Pisanski K, Reby D, *et al.* The role of visual experience in the emergence of cross-modal correspondences. *Cognition*, 2018, **175**: 114-121
- [89] Ahissar M, Hochstein S. The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning. *Trends Cogn Sci*, 2004, **8**(10): 457-464
- [90] Pavlovskaya M, Hochstein S. Perceptual learning transfer between hemispheres and tasks for easy and hard feature search conditions. *J Vision*, 2011, **11**(1): 8
- [91] Zaltz Y, Kishon-Rabin L, Karni A, *et al.* Practice makes transfer imperfect: evidence from auditory learning. *Ear Hear*, 2020, **41**(6): 1470-1482
- [92] Proulx M J, Brown D J, Pasqualotto A, *et al.* Multisensory perceptual learning and sensory substitution. *Neurosci Biobehav Res*, 2014, **41**: 16-25
- [93] Angelaki D E, Gu Y, Deangelis G C. Multisensory integration: psychophysics, neurophysiology, and computation. *Curr Opin Neurobiol*, 2009, **19**(4): 452-458
- [94] Eberhardt S P, Auer E T, Jr., Bernstein L E. Multisensory training can promote or impede visual perceptual learning of speech stimuli: visual-tactile vs. visual-auditory training. *Front Hum Neurosci*, 2014, **8**: 829
- [95] Frost R, Armstrong B C, Christiansen M H. Statistical learning research: a critical review and possible new directions. *Psychol Bull*, 2019, **145**(12): 1128-1153
- [96] Conway C M, Christiansen M H. Statistical learning within and between modalities: pitting abstract against stimulus-specific representations. *Psychol Sci*, 2006, **17**(10): 905-912
- [97] Li X J, Zhao X D, Shi W D, *et al.* Lack of cross-modal effects in dual-modality implicit statistical learning. *Front Psychol*, 2018, **9**: 146
- [98] Bratzke D, Seifried T, Ulrich R. Perceptual learning in temporal discrimination: asymmetric cross-modal transfer from audition to vision. *Exp Brain Res*, 2012, **221**: 205-210
- [99] McGovern D P, Astle A T, Clavin S L, *et al.* Task-specific transfer of perceptual learning across sensory modalities. *Curr Biol*, 2016, **26**(1): R20-R21
- [100] Bulf H, Quadrelli E, Brady S, *et al.* Rule learning transfer across linguistic and visual modalities in 7-month-old infants. *Infancy*, 2021, **26**(3): 442-454
- [101] Roark C L, Paulon G, Sarkar A, *et al.* Comparing perceptual category learning across modalities in the same individuals. *Psychon Bull Rev*, 2021, **28**(3): 898-909
- [102] Hu D-Z, Wen K, Chen L-H, *et al.* Perceptual learning evidence for supramodal representation of stimulus orientation at a conceptual level. *Vision Res*, 2021, **187**: 120-128
- [103] Gori M, Del Viva M, Sandini G, *et al.* Young children do not integrate visual and haptic form information. *Curr Biol*, 2008, **18**(9): 694-698
- [104] Guttman S E, Gilroy L A, Blake R. Hearing what the eyes see: auditory encoding of visual temporal sequences. *Psychol Sci*, 2005, **16**(3): 228-235
- [105] Burki A, Viebahn M, Gafos A. Plasticity and transfer in the sound system: exposure to syllables in production or perception changes their subsequent production. *Lang Cogn Neurosci*, 2020, **35**(10): 1371-1393
- [106] Hofstetter S, Zuiderbaan W, Heimler B, *et al.* Topographic maps and neural tuning for sensory substitution dimensions learned in adulthood in a congenital blind subject. *Neuroimage*, 2021, **235**: 118029
- [107] Schwenkler J. On the matching of seen and felt shape by newly sighted subjects. *Iperception*, 2012, **3**(3): 186-188
- [108] Purpura G, Perazza S, Cioni G, *et al.* Visuo-haptic transfer for object recognition in children with periventricular leukomalacia and bilateral cerebral palsy. *Child Neuropsychol*, 2019, **25**(8): 1084-1097
- [109] Harrap M J M, Lawson D A, Whitney H M, *et al.* Cross-modal transfer in visual and nonvisual cues in bumblebees. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, 2019, **205**(3): 427-437
- [110] Hupp J M, Sloutsky V M. Learning to learn: from within-modality to cross-modality transfer during infancy. *J Exp Child Psychol*, 2011, **110**(3): 408-421
- [111] Jao R J, James T W, James K H. Multisensory convergence of visual and haptic object preference across development. *Neuropsychologia*, 2014, **56**: 381-392
- [112] Geangu E, Roberti E, Turati C. Do infants represent human actions cross-modally? An ERP visual-auditory priming study. *Biol Psychol*, 2021, **160**: 108047
- [113] Purpura G, Cioni G, Tinelli F. Development of visuo-haptic transfer for object recognition in typical preschool and school-aged children. *Child Neuropsychol*, 2018, **24**(5): 657-670
- [114] Alvarado J C, Rowland B A, Stanford T R, *et al.* A neural network model of multisensory integration also accounts for unisensory integration in superior colliculus. *Brain Res*, 2008, **1242**: 13-23

- [115] Bean N L, Smyre S A, Stein B E, *et al.* Noise-rearing precludes the behavioral benefits of multisensory integration. *Cereb Cortex*, 2022, **33**(4): 948-958
- [116] Perrault T J, Jr., Vaughan J W, Stein B E, *et al.* Superior colliculus neurons use distinct operational modes in the integration of multisensory stimuli. *J Neurophysiol*, 2005, **93**(5): 2575-2586
- [117] Wallace M T, Stein B E. Sensory and multisensory responses in the newborn monkey superior colliculus. *J Neurosci*, 2001, **21**(22): 8886-8894
- [118] Smyre S A, Wang Z, Stein B E, *et al.* Multisensory enhancement of overt behavior requires multisensory experience. *Eur J Neurosci*, 2021, **54**(2): 4514-4527
- [119] Kattner F, Cox C R, Green C S. Transfer in rule-based category learning depends on the training task. *PLoS One*, 2016, **11**(10): e0165260
- [120] Tanaka K, Watanabe K. Effects of learning with explicit elaboration on implicit transfer of visuomotor sequence learning. *Exp Brain Res*, 2013, **228**(4): 411-425
- [121] Kurtz K J, Honke G. Sorting out the problem of inert knowledge: category construction to promote spontaneous transfer. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2020, **46**(5): 803-821
- [122] Ngu B H, Yeung A S. Fostering analogical transfer: the multiple components approach to algebra word problem solving in a chemistry context. *Contemp Educ Psychol*, 2012, **37**(1): 14-32
- [123] Kurtz K J, Boukrina O, Gentner D. Comparison promotes learning and transfer of relational categories. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2013, **39**(4): 1303-1310
- [124] Piskoet J, Sarapuu T. Supporting students' knowledge transfer in modeling activities. *J Educ Comput Res*, 2014, **50**(2): 213-229
- [125] Mussgens D M, Ullen F. Transfer in motor sequence learning: effects of practice schedule and sequence context. *Front Hum Neurosci*, 2015, **9**: 642
- [126] Bjork R A, Kroll J F. Desirable difficulties in vocabulary learning. *Am J Psychol*, 2015, **128**(2): 241-252
- [127] Schorn J M, Knowlton B J. Interleaved practice benefits implicit sequence learning and transfer. *Mem Cogn*, 2021, **49**(7): 1436-1452
- [128] Goerke M, Muller N G, Cohrs S. Sleep-dependent memory consolidation and its implications for psychiatry. *J Neural Transm*, 2017, **124**(Suppl 1): 163-178
- [129] Diekelmann S, Wilhelm I, Born J. The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation. *Sleep Med Rev*, 2009, **13**(5): 309-321
- [130] Durrant S J, Cairney S A, Lewis P A. Cross-modal transfer of statistical information benefits from sleep. *Cortex*, 2016, **78**: 85-99
- [131] Walker M P, Brakefield T, Morgan A, *et al.* Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning. *Neuron*, 2002, **35**(1): 205-211
- [132] Atienza M, Cantero J L, Dominguez-Marín E. The time course of neural changes underlying auditory perceptual learning. *Learn Mem*, 2002, **9**(3): 138-150
- [133] Grzeczowski L, Cretenoud A F, Mast F W, *et al.* Motor response specificity in perceptual learning and its release by double training. *J Vision*, 2019, **19**(6): 4
- [134] Xiao L Q, Zhang J Y, Wang R, *et al.* Complete transfer of perceptual learning across retinal locations enabled by double training. *Curr Biol*, 2008, **18**(24): 1922-1926
- [135] Zhang J Y, Zhang G L, Xiao L Q, *et al.* Rule-based learning explains visual perceptual learning and its specificity and transfer. *J Neurosci*, 2010, **30**(37): 12323-12328
- [136] Shapiro S, Spence M T, Gregan-Paxton J. Factors affecting the acquisition and transfer of novel attribute relationships to new product categories. *Psychol Market*, 2009, **26**(2): 122-144
- [137] Uno K, Asano M, Kadowaki H, *et al.* Grapheme-color associations can transfer to novel graphemes when synesthetic colors function as grapheme "discriminating markers". *Psychon Bull Rev*, 2020, **27**(4): 700-706
- [138] Spence C. Crossmodal correspondences: a tutorial review. *Atten Percept Psychophys*, 2011, **73**(4): 971-995
- [139] Zeljko M, Grove P M, Kritikos A. The lightness/pitch crossmodal correspondence modulates the rubin face/vase perception. *Multisens Res*, 2021, **34**(7): 763-783
- [140] Feng F, Li P, Stockman T. Exploring crossmodal perceptual enhancement and integration in a sequence-reproducing task with cognitive priming. *J Multimodal User Interfaces*, 2021, **15**(1): 45-59
- [141] Bolam J, Boyle S C, Ince R A, *et al.* Neurocomputational mechanisms underlying cross-modal associations and their influence on perceptual decisions. *Neuroimage*, 2022, **247**: 118841
- [142] Qi Y, Zhao H, Wang C, *et al.* Transfer of repeated exposure cost *via* color-flavor associations. *J Sens Stud*, 2020, **35**(4): 12578
- [143] Bartolo R, Merchant H. Learning and generalization of time production in humans: rules of transfer across modalities and interval durations. *Exp Brain Res*, 2009, **197**(1): 91-100
- [144] Tunney R J, Altmann G T M. Two modes of transfer in artificial grammar learning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2001, **27**(3): 614-639
- [145] Ashby F G, Alfonso-Reese L A, Turken A U, *et al.* A neuropsychological theory of multiple systems in category learning. *Psychol Rev*, 1998, **105**(3): 442-481
- [146] Maddox W T, Pacheco J, Reeves M, *et al.* Rule-based and information-integration category learning in normal aging. *Neuropsychologia*, 2010, **48**(10): 2998-3008
- [147] Zakrzewski A C, Church B A, Smith J D. The transfer of category knowledge by macaques (*Macaca mulatta*) and humans (*Homo sapiens*). *J Comp Psychol*, 2018, **132**(1): 58-74
- [148] Casale M B, Roeder J L, Ashby F G. Analogical transfer in perceptual categorization. *Mem Cogn*, 2012, **40**(3): 434-449
- [149] Le Pelley M E, Newell B R, Nosofsky R M. Deferred feedback does not dissociate implicit and explicit category-learning systems: commentary on Smith *et al.* (2014). *Psychol Sci*, 2019, **30**(9): 1403-1409
- [150] Edmunds C E R, Milton F, Wills A J. Feedback can be superior to observational training for both rule-based and information-

- integration category structures. *Q J Exp Psychol (Hove)*, 2015, **68**(6): 1203-1222
- [151] Han Y C, Reber P J. Implicit sequence learning using auditory cues leads to modality-specific representations. *Psychon Bull Rev*, 2022, **29**(2): 541-551
- [152] Chen L, Guo L, Bao M. Sleep-dependent consolidation benefits fast transfer of time interval training. *Exp Brain Res*, 2017, **235**(3): 661-672
- [153] Wiener M, Turkeltaub P E, Coslett H B. Implicit timing activates the left inferior parietal cortex. *Neuropsychologia*, 2010, **48**(13): 3967-3971
- [154] Stevens D, Anderson D I, O'dwyer N J, *et al.* Does self-efficacy mediate transfer effects in the learning of easy and difficult motor skills?. *Conscious Cogn*, 2012, **21**(3): 1122-1128
- [155] Mcdaniel M A, Cahill M J, Robbins M, *et al.* Individual differences in learning and transfer: stable tendencies for learning exemplars versus abstracting rules. *J Exp Psychol Gen*, 2014, **143**(2): 668-693
- [156] Woltz D J, Gardner M K, Bell B G. Negative transfer errors in sequential cognitive skills: strong-but-wrong sequence application. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2000, **26**(3): 601-625
- [157] Kattner F, Samaan L, Schubert T. Cross-modal transfer after auditory task-switching training. *Mem Cogn*, 2019, **47**(5): 1044-1061
- [158] Gajewski P D, Ferdinand N K, Kray J, *et al.* Understanding sources of adult age differences in task switching: evidence from behavioral and ERP studies. *Neurosci Biobehav Res*, 2018, **92**: 255-275
- [159] Toovey B R W, Kattner F, Schubert T. Cross-modal transfer following auditory task-switching training in old adults. *Front Psychol*, 2021, **12**: 615518
- [160] Gaal Z A, Czigler I. Task-switching training and transfer. *J Psychophysiol*, 2018, **32**(3): 106-130
- [161] Sala G, Gobet F. Cognitive training does not enhance general cognition. *Trends Cogn Sci*, 2019, **23**(1): 9-20
- [162] Peng F, Chittka L. A simple computational model of the bee mushroom body can explain seemingly complex forms of olfactory learning and memory. *Curr Biol*, 2017, **27**(2): 224-230
- [163] Ziebell P, Stumpfing J, Eidel M, *et al.* Stimulus modality influences session-to-session transfer of training effects in auditory and tactile streaming-based P300 brain-computer interfaces. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 11873
- [164] Kim J K, Zatorre R J. Generalized learning of visual-to-auditory substitution in sighted individuals. *Brain Res*, 2008, **1242**: 263-275
- [165] Kim J K, Zatorre R J. Can you hear shapes you touch?. *Exp Brain Res*, 2010, **202**(4): 747-754

Crossmodal Transfer and Its Cognitive Neural Mechanisms*

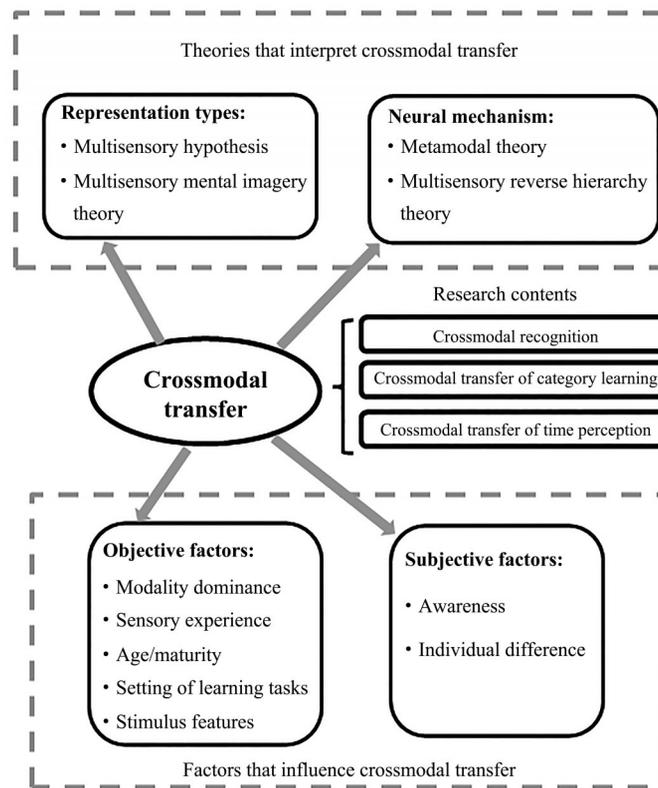
SUN Ying^{1,2}, SUN Xun-Wei³, WANG Yi-Fan^{1,2}, FU Qiu-Fang^{1,2}**

⁽¹⁾State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁽²⁾Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁽³⁾School of Psychological and Cognitive Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Graphical abstract



Abstract Crossmodal transfer is the ability to apply the knowledge acquired in one sensory modality to another. Researches on crossmodal transfer investigate how the brain represents information from different sensory modalities, and provide new insights to improve cognitive processing efficiency and reduce repeated learning. To clarify the characteristics and mechanism of crossmodal transfer, this article first introduced the crossmodal transfer effect in different field of research, such as object recognition, category learning, and time perception.

* This work was supported by grants from the National Key Research and Development Program of China (2018AAA0100205), The National Natural Science Foundation of China (62061136001), and the German Research Foundation (DFG TRR-169).

** Corresponding author.

Tel: 86-10-64845395, E-mail: fuqf@psych.ac.cn

Received: October 27, 2022 Accepted: April 3, 2023

After that, the theoretical researches on the representation type of crossmodal transfer were reviewed, mainly including multisensory theory and multisensory mental imagery theory as well as the supportive and opposite findings. The research progresses on the neural mechanism of crossmodal transfer using ERP and fMRI techniques were introduced, mainly including metamodal theory, and multisensory reverse hierarchy theory as well as the supportive and opposite findings. The objective and subjective factors which influenced crossmodal transfer effect were sorted out, in which we suggested that the modality dominance phenomenon supports the metamodal theory, while other factors such as sensory experience, age, setting of learning tasks and stimulus features support theories such as the multisensory hypothesis. Finally, we described the potential applications of the current research findings on crossmodal transfer and pointed out future research questions in this field.

Key words crossmodal transfer, multisensory representation, crossmodal recognition, modality dominance, metamodal theory

DOI: 10.16476/j.pibb.2022.0508