

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.05.017

医学信号处理与医学仪器

不同视错觉刺激诱发的事件相关电位的脑电研究进展

杨兰,随力,刘亮,吴拾瑶

上海理工大学医疗器械与食品学院,上海 200093

【摘要】介绍近年来视错觉的事件相关电位(Event-Related Potential, ERP)的研究进展,为未来更深入地探讨视错觉的心理、生理加工机制和指导基于视错觉的研究提供新的视角。归纳国内外已有的视错觉ERP研究结果,总结ERP在视错觉知觉加工机制中的意义及影响因素,阐述视错觉的类型、特点、知觉加工理论模型和信息传导路径,最后提出视错觉ERP的研究方向和研究趋势。虽然视错觉的种类十分繁杂,特点各不相同,现有的视错觉知觉加工的理论模型也不少,但是视错觉的ERP研究均表明视错觉遵循知觉的自上而下的控制理论,视错觉的信息传导路径和真实视觉知觉的路径一致,ERP成分反映了视错觉的知觉感知机制和信息处理机制。视错觉的ERP研究在揭示视错觉的心理、生理机制及评价视错觉效应上具有较广泛的发展及应用前景。

【关键词】事件相关电位;视错觉;神经信息处理;脑电;综述

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)05-0613-07

Advances in research on event-related potentials evoked by different visual illusions

YANG Lan, SUI Li, LIU Liang, WU Shiyao

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: The advances in research on event-related potentials (ERP) evoked by visual illusions are summarized, thereby providing a new perspective for the further study on the psychological and physiological mechanisms of visual illusions and the guidance for researches based on visual illusions. The ERP researches on visual illusions at home and abroad are reviewed, and the significance of ERP in perception processing mechanism of visual illusions and their influencing factors are summarized. Moreover, the types, characteristics, perceptual processing theory models and information processing pathways of visual illusions are described. Finally, the research directions and trends of ERP in visual illusions are put forward. Even though visual illusions have various types and different characteristics, and there are many theoretical models to explain the perception processing mechanisms of visual illusions, some conclusions can be obtained. The ERP research on visual illusions is abided by the top-down control theory of perception; and the information processing of visual illusions share the same pathways as the real visual perception; and ERP research on visual illusion has a wide range of development and application prospects in revealing the psychological and physiological mechanisms of visual illusions and evaluating the effects of visual illusions.

Keywords: event-related potential; visual illusion; neural information processing; electroencephalogram; review

前言

视错觉是指人类通过眼睛和大脑获取外界的各种信息,所观察到的事物会因为先前经验的支配、自身生理条件的影响、客观因素的干扰等^[1]出现对事物

产生的一种固有倾向的感知或不正确判断,视错觉属于知觉的一种特殊存在方式^[2]。事件相关电位(Event-Related Potential, ERP)拥有极高的时间分辨率^[3],是探讨大脑认知信息处理的理想工具^[4]。视错觉的ERP研究不仅可以揭示视错觉的心理、生理加工机制,而且在评价和指导基于视错觉的设计中也起到十分重要的作用。本文归纳总结了国内外已有的视错觉ERP研究成果。

1 视错觉简介

1.1 视错觉的分类及特点

【收稿日期】2021-01-06

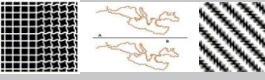
【基金项目】上海理工大学科技发展项目(2019KJFZ239, 2020KJFZ232);
国家自然科学基金(11179015)

【作者简介】杨兰,硕士研究生,研究方向:生物医学工程, E-mail: 754-256539@qq.com

【通信作者】随力,教授,研究方向:神经工程, E-mail: lsui@usst.edu.cn

视错觉的感知过程及其命名极其复杂,因此视错觉目前尚缺少一个公认的分类标准。按照视错觉的成因和特点,初步将视错觉分为5类^[5]。视错觉的名称、特点和典型的例子见表1。

表1 视错觉的分类、特点和举例
Tab.1 Classifications, characteristics and examples of visual illusions

类型名称	特点	举例
几何错觉	对规律的几何结构体的面积、长度、体积、形状等物理特性做出错误判断的现象	
细胞群错觉	因功能相似的神经细胞群作用对刺激的方向模式等物体特性产生误解的现象	
轮廓错觉	从不完整信息图片中主动识别并且补全轮廓的现象	
不可能图形	在客观上不可能存在的一类图形	
运动错觉	关于目标、方向等的错误判断或者由静止图片观察产生运动错觉的现象	

1.2 视错觉的应用领域

视错觉在诸多研究领域及日常生活中有着广泛的应用,目前主要集中在四大领域内,即心理学领域、生理学领域、计算机视觉领域和建筑、设计与艺术领域。

在心理学研究领域,视错觉的结构被用来解释复杂的心理认知过程^[6],形成了几种视错觉的心理学理论假说,如自上而下(视错觉的产生是受先前经验的影响)、自下而上(视错觉的高级心理认知还原为低级的过程)^[7]、格式塔完形假说、深度假说、亮度对比假说等^[8]。视错觉的种类繁杂,目前还没有一种心理学理论可以适用于所有视错觉。视错觉还与生理因素密不可分^[9],关于视错觉的生理学解释有侧抑制神经网络说、色觉相对处理学说、眼动理论^[10-11]等。视错觉的生理学研究重点在将视错觉的认知过程与神经信息处理联系起来,揭示视错觉的生理机制^[12]。计算机视觉研究领域,视错觉还可以结合计算机技术建立数学模型,模拟视错觉形成过程中的认知输出^[13]。如利用电磁场和非线性动态模型模拟视错觉产生的知觉反转。又如将视错觉的认知过程量化成带有反馈和干涉的数学递归过程,将计算机编程与视错觉的认知过程统一结合起来^[14]。在建筑、设计与艺术领域利用色彩变化、线条排列、图形组合等形式造成的视错觉效应^[15]可以实现“矮中见高”、“虚中见实”、“粗中见细”、“曲中见直”等效果^[16]。在实用性和趣味性相结合、增强用户情感和互动体验的交互式设计及各类创新性设计中发挥着较大的作用,

可以说视错觉的研究和运用能为设计行业提供源源不断的活力与源泉^[17-18]。

视错觉的应用领域十分广泛,进行视错觉研究,揭示视错觉的神经信息处理机制具有较重要的理论和实践价值。

2 ERP简介

ERP也被称为认知电位,是脑在认知过程中产生的电位变化,是由刺激因素引起的脑诱发电位,通常是基于常规脑电图记录方法外加叠加平均技术而捕捉到的脑电信号改变,因此ERP信号和脑认知过程中的神经信息处理过程高度相关^[19]。ERP中含有不同的成分,通常成分的命名根据正负波分别定义为P(positive)或N(negative),其后的数值为该波的潜伏期,如目前已经发现的ERP成分有P100(也称P1)/N100(也称N1)、N170、N200(也称N2)、P300(也称P3)家族、N400等。ERP信号和常规脑电信号一样,拥有非常高的时间分辨率,可达毫秒级^[20]。

ERP不仅可以用来揭示认知机制,了解认知过程中的脑电生理特征,还可以用作认知功能评价,在临床和基础医学方面,ERP可以用于神经精神性疾病,如脑功能障碍、脑损伤、脑疲劳等认知功能评价。在工业设计方面,ERP可以用于产品设计评价及交互设计评价,如评价用户的喜好、消费者的决策过程、用户的情绪和情感及产品的舒适度等。ERP的成分,如P300、N400、失匹配负波(MMN)、关联性负变(CNV)等,均可以作为认知功能评价的指标。总之,ERP作

为认知电位在许多领域都有较好的应用前景。

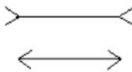


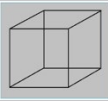





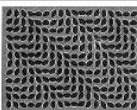
3 国内外视错觉 ERP 研究的主要结果及结论

3.1 主要结果

国内外视错觉 ERP 研究并不是特别多,数量还

十分有限,目前已有的视错觉 ERP 研究均是以视错觉图形作为刺激材料来诱发 ERP 脑电变化,从而来揭示视错觉的知觉过程和神经信息处理过程。将近年来相关研究成果进行归纳整理,视错觉 ERP 研究的主要实验结果见表2。

表2 视错觉 ERP 研究的主要实验结果
Tab.2 Main experimental results of event-related potential (ERP) researches on visual illusions

视错觉名称及描述	视错觉图形	主要实验结果
缪勒-莱尔错觉 ^[21] :线段两端的括号向内括比向外括在视觉上短		枕区 P280-450 随着刺激的增强幅值增大
运动后效 ^[22] :运动的光圈突然静止,会产生与之前运动方向相反的错觉		枕颞区(右后颞区)的P160幅值显著增加
人脸花瓶错觉 ^[23] :通过黑白背景的转换,相同轮廓可以观察到花瓶或脸		脑前区的N100、P160、N320和后区的P100、N160由视错觉刺激引起,花瓶反应引起的前N100和N320比脸反应诱发的幅值更大
内克尔矩形错觉 ^[24] :同一个立方体包含两种不同角度的错觉		枕区的P100和130 ms的逆转阳性的振幅随立方体变大而增加
老/年轻女人错觉 ^[25] :在同一张图的正放和倒置中分别观察到年轻和年迈女人		枕颞区的N170引起的知觉逆转负性
不可能三叉戟图形 ^[26] :结构上不可能存在的图形		错觉诱发了P250-310(海马旁回)、N400-500(扣带前回和右侧颞叶)和P500-600
波根多夫错觉 ^[27] :斜线被平行竖直的线截断,两竖线中间部分不显示,剩余斜线似乎不共线		错觉刺激诱发的N400-600幅值增加
撒切尔错觉 ^[28] :除眼睛和嘴巴外其余部分倒置与原图直接倒置似乎无差别		在N170、P200和P300处发现了知觉反转的影响
弗雷泽错觉 ^[29] :同心圆和双绞线交叉的背景使同心圆看起来像螺旋结构		脑后区的P220-280和前区的P350-450中,螺旋线比同心圆诱发的幅值更大
麦浪错觉 ^[30] :麦浪似动现象		错觉诱发顶枕区的C1、枕叶的P100和颞叶的P200均幅值增大

3.2 主要结论

上述国内外视错觉的 ERP 研究结果表明,不同的视错觉图形对应着不同脑区、不同 ERP 成分的改变,ERP 成分改变和视错觉的知觉过程和神经信息处理过程高度相关。视错觉的 ERP 成分变化在视错觉知觉中的意义总结归纳见表3。

值得一提的是视错觉引起的 ERP 成分的变化并

不是仅局限于 ERP 的一种成分,常常是 ERP 的几种成分都发生了改变,如不可能三叉戟视错觉图形可以引起 P250-310、N400-500 和 P500-600 三种 ERP 成分的变化^[26]。因此,基于视错觉的 ERP 研究结果来揭示视错觉的知觉和神经信息处理机制时,要综合考虑不同 ERP 成分在视错觉中的意义,才能较全面、较系统地揭示视错觉的知觉和信息处理过程。例

表3 常见视错觉ERP成分及知觉意义
Tab.3 Common ERP components of visual illusions and perceptual definitions

ERP成分	ERP的知觉意义
C1	反映刺激的物理属性,体现视错觉在初级视觉皮层区域的激活
P100/N100	反映视错觉加工的早期阶段,包括注意力资源量、特征察觉、冲突知觉等过程
P160	反映实际运动的感知,与运动错觉有关
N170	反映面孔刺激的加工,包括局部特征反转、特征选择和刺激评估等过程
N200	反映冲突监控及抑制的过程与强度
P250-310(P300)	反映人对新异刺激的朝向反射,体现心理资源量和认知过程的难度
N320	反映知觉加工过程,整合分散特征、多进程刺激评估/分类操作、注意力资源量
N400-500	反映认知控制和认知过程的神经表征,与冲突检测过程以及竞争性反应的选择有关

如,上述的不可能三叉戟视错觉引起的3种ERP成分的变化,考虑到P250-310参与了注意过程中的目标刺激的早期识别与分类^[31],N400-500与认知冲突和空间信息的整合过程有关^[32],而P500-600的潜伏期与刺激评价和分类的持续时间有关。因此,研究人员推测不可能三叉戟视错觉可能存在3个认知加工过程,即分别为早期识别过程、认知冲突过程和刺激评价过程,并且早期的加工过程可能包括注意、特征察觉、冲突知觉等过程。而后期评价过程可能与判断过程中的决策作用有关^[33]。

总之,进行视错觉ERP实验结果的结论推断时,需要综合考虑视错觉的类型、ERP的部位、ERP的成分及ERP成分的知觉意义。

4 视错觉ERP现象的神经机制

4.1 心理理论机制

理论心理学家根据视错觉的ERP实验结果来反演适用于视错觉的心理学理论,目前提出的适用于视错觉的心理学理论有很多种,如深度理论、概率假设、双模假设和双稳态感知模型等,但这些理论或假设往往仅适用于一些特定的视错觉现象。譬如,适用于波根多夫错觉的深度理论,该理论认为物体的深度线索决定了物体的表观尺寸,ERP成分中的N400-600的改变支持了这一理论。适用于缪勒-莱尔错觉的概率假设认为视觉感知是一个基本的概率过程,ERP中的P300支持这一学说^[34]。再比如,针对于知觉反转错觉提出的双模假设,该假设认为视错

觉的处理过程中存在两种感知模式^[35-36],即能够稳定感知两种不同的视觉效果,并能有意识地进行切换,人脸花瓶错觉诱发的ERP成分中的P1、N1和LPC成分都与知觉反转有关^[37-38],支持了这一假设。综上所述,这些知觉理论或假设能较好地解释特定的视错觉现象,但还不具备普适性。

目前适用于较多的视错觉的心理学理论依然是传统认知心理学上的自上而下控制理论^[27,39],如在波根多夫错觉中,局部线索很容易抑制了经验的影响,从而能做出正确的判断;在缪勒-莱尔错觉中,观察者的空间注意力选择性地定向到诱导错觉的箭头处即可改变错觉的大小^[34],这些都有力地证实了视错觉的自上而下控制理论。至于传统认知心理学上的自上而下控制理论是否适用于所有的视错觉现象,目前尚缺少统一的定论。

4.2 神经信息传递机制

视觉知觉的视觉信息由丘脑的外侧膝状体(Lateral Geniculate Nucleus, LGN)传入初级视觉皮层(V1区)和次级视觉皮层(V2区)^[40],而后分为两路。腹侧通路从枕叶到颞叶,由V1、V2、VP、V4区以及颞下回组成,主要识别颜色和形状等信息。背侧通路从枕叶到后顶叶,由V1、V2、V5/MT区及顶区组成,与运动和深度信息有关。然而有些研究表明两通路之间也并不完全独立,不排除共同作用的情况,视觉知觉的双通路模式图见图1。

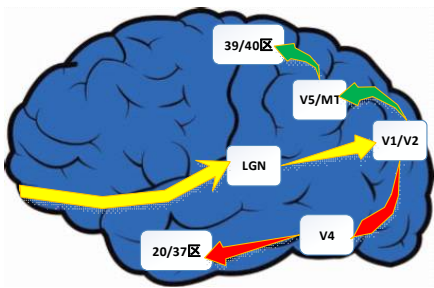


图1 双通路模式图
Fig.1 Dual-pathway model of visual perception

视错觉的神经信息传递机制,目前的研究结果都支持视觉知觉的双通路模式^[41]。麦浪错觉(麦浪似动现象)的ERP研究结果显示了枕叶的P100和颞叶的P200的ERP改变^[30],表明麦浪错觉的视错觉信息传递是从枕叶传向颞叶,遵循着视觉的腹侧通路。同样,花瓶-脸错觉^[42](同一图形中可以观察到花瓶或脸的轮廓)的知觉研究显示脑区的兴奋从枕叶,途径梭状回,而传向颞叶,同样支持视觉知觉的腹侧传导路径模式。

缪勒-莱尔错觉的ERP研究表明神经信息的传递

通路途径前扣带回, 遵循着视觉知觉的背侧通路。虚幻轮廓错觉的研究也表明虚幻轮廓错觉的知觉和真实知觉在V2区是重叠的,V2区的神经元群都处于兴奋状态。目前所有的视错觉的ERP研究均表明视错觉和真实视觉知觉享有同样的神经信息传导路径。

5 影响视错觉 ERP 实验结果的因素

5.1 注意力的影响

视错觉的ERP研究表明注意力可以影响视错觉的ERP实验结果,在ERP的各种成分中,N100和P100都与注意力有关,这两种ERP成分反映了视错觉知觉中的选择性的空间注意力;ERP中的P300成分的振幅反映了认知任务中使用的注意资源量。运动后效视错觉类型诱发的ERP成分中P160的改变可能也与左右半脑的注意力差异有关^[43]。目前的研究表明注意力可以在反应时间、感受程度以及知觉效果方面来影响视错觉。在人脸花瓶错觉检测中,高度集中注意力可以缩短反应时间;在艾宾浩斯错觉(图2,由两个一模一样的圆,分别被比它大很多和小很多的圆包围组成)研究中,缩小空间注意力范围,错觉的感知就会明显减弱^[44]。在波根多夫及其类似的变形错觉研究中,注意力可以影响这种复杂的共线性的判断,将注意力集中于局部特征时就很容易做出正确判断^[45]。注意力影响视错觉的ERP研究结果和注意力改变了视错觉知觉过程中的神经元群兴奋性的区域大小有密切关系。



图2 艾宾浩斯错觉
Fig.2 Ebbinghaus illusion

5.2 熟悉度的影响

熟悉度也可以影响视错觉的ERP实验结果,通常熟悉度高相比于熟悉度低的视错觉刺激,诱导出的ERP的幅值较低。例如在弗雷泽错觉中,熟悉度较高的圆形刺激产生的ERP的P220-280成分的幅值要小于熟悉度较低的螺旋形刺激产生的P220-280的幅值^[29],因此,实验结果说明熟悉度与脑的活动度成反比关系。

5.3 听觉的影响

人体的感觉是多通道的,视听结合对视错觉有

一定的影响。在麦格错觉研究中,原本和错觉刺激无关的听觉刺激一旦和视错觉刺激偶联起来,那么听觉刺激就可以进入视听整合处理过程^[46],并在ERP的300~340 ms成分中表现出来。有研究表明,在单纯听觉刺激并不能使视觉系统产生神经冲动时,施加视听偶联刺激,视觉系统可以在很短的时间内(如80 ms)作出反应,并且再次施加单纯的听觉刺激就可在初级视觉皮层V1区中诱发出视觉反应^[47]。

6 总结和展望

本文归纳和总结了近年来视错觉现象的ERP研究,ERP技术的高时间分辨率决定了采用ERP技术来研究视错觉可以较好地揭示视错觉的知觉和神经信息处理机制,尽管视错觉的ERP研究结果多种多样,其多样性体现在不同的大脑皮层区域、ERP成分和ERP幅值等方面,但是基于这些研究结果,可以得出ERP不同成分的变化反映了视错觉的知觉及信息处理过程,总的来说,在知觉处理上,视错觉遵循自上而下的控制理论;在神经信息处理上,视错觉和真实视觉的传导路径是一致的。

未来视错觉ERP的研究方向和研究趋势可能存在于以下几个方面:第一,在视错觉的分类、视错觉的知觉和神经信息处理方面:视错觉的种类很多,按照成因和特点将视错觉分为六类,本文按照此种视错觉分类方法归纳总结了视错觉的ERP研究结果和结论,可以看出按照此种分类方法,不同类型的视错觉或同一类型内不同的视错觉现象的ERP研究结果缺少共性,ERP的多样性表现在不同的脑区、不同的ERP成分等方面。随着视错觉ERP研究的逐步深入,依据视错觉的ERP实验结果,即依据视错觉的知觉和神经信息处理方式来进行视错觉的分类将是未来的一个研究方向。目前总的说来,视错觉的ERP研究还十分有限,采用ERP研究手段来进行更多的视错觉现象研究,揭示视错觉现象的知觉和神经信息机制,并在不同的视错觉现象的ERP研究中寻找视错觉现象的共性将是未来的一个发展趋势。第二,在视错觉的研究方法和技术手段方面:脑电的ERP研究方法具有极高的时间分辨率的优势,但其在空间分辨率上尚存在一定的缺陷,将ERP研究方法偶联空间分辨率较高的一些技术手段,如功能性核磁共振成像技术、功能性近红外成像系统或正电子发射断层扫描技术等,从高时空分辨率角度揭示视错觉信息处理的功能定位也是未来视错觉研究的研究趋势。人体的感觉从来都不是单一的,视觉、听觉、触觉、嗅觉等都是人体重要的感觉,并且几种感觉可以相互影响。视错觉属视觉感觉,也会受到其

他感觉通道的影响,探索视错觉和其他感觉通道之间的关系也将成为未来视错觉的一个研究方向。第三,在视错觉效应的拓展和视错觉效应的ERP评价方面:视错觉现象不仅引起了心理学家、生理学家、计算机学家的关注,视错觉效应在工业设计、艺术设计、建筑、舞蹈及魔术等领域扮演了重要的角色,视错觉作为一种视觉艺术可以带来不同寻常的视觉冲击,引起相应的视错觉效应,视错觉的设计及视错觉效应的拓展无疑将是未来视错觉的发展趋势。视错觉的ERP研究不仅可以揭示视错觉的知觉、神经信息传递机制,而且在视错觉的认知心理、情绪情感等视错觉效应的评价上发挥着重要的作用,采用ERP研究方法和手段来进行视错觉效应的评估,进而来指导视错觉艺术形式的设计将是未来视错觉ERP的研究方向和研究趋势。

【参考文献】

- [1] 丁建平,张春风,沈广宇.浅析生活中的视错觉现象及其在电视美术中的运用[J]. 艺术科技, 2010, 17(3): 48-51.
DING J P, ZHANG C F, SHEN G Y. A brief analysis of visual illusion in life and application in TV art [J]. Art and Technology, 2010, 17(3): 48-51.
- [2] ALTSCHULER T S, MOLHOLM S, RUSSO N N, et al. Early electrophysiological indices of illusory contour processing within the lateral occipital complex are virtually impervious to manipulations of illusion strength[J]. NeuroImage, 2012, 59(4): 4074-4085.
- [3] 姚小强.服刑人员精神病态特质与决策缺陷[D]. 南昌: 江西师范大学, 2019.
YAO X Q. Psychopathic traits and decision-making defects of prisoners[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2019.
- [4] GU L, ZHANG Z. Exploring potential electrophysiological biomarkers in mild cognitive impairment: a systematic review and meta-analysis of event-related potential studies [J]. J Alzheimer's Dis, 2017, 58(4): 1283-1292.
- [5] 刘宏,李哲媛,许超.视错觉现象的分类和研究进展[J]. 智能系统学报, 2011, 6(1): 1-12.
LIU H, LI Z Y, XU C. Classification and research progress of visual illusion [J]. Journal of Intelligent Systems, 2011, 6(1): 1-12.
- [6] TOMIMATSU E, ITO H, SUNAGA S, et al. Halt and recovery of illusory motion perception from peripherally viewed static images[J]. Atten Percept Psychophys, 2011, 73(6): 1823-1832.
- [7] 李小健,刘东台.视错觉产生的神经机制[J]. 心理科学进展, 2008, 16(4): 555-561.
LI X J, LIU D T. Neural mechanism of visual illusion[J]. Advances in Psychological Science, 2008, 16(4): 555-561.
- [8] SEGHER M L, VUILLEUMIER P. Functional neuroimaging findings on the human perception of illusory contours[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2006, 30(5): 595-612.
- [9] FANG F, HE S. Cortical responses to invisible objects in the human dorsal and ventral pathways[J]. Nat Neurosci, 2005, 8(10): 1380-1385.
- [10] 马先兵,孙水发,夏平,等.视错觉及其应用[J]. 电脑与信息技术, 2012, 20(3): 1-3.
MA X B, SUN S F, XIA P, et al. Visual illusion and application[J]. Computer and Information Technology, 2012, 20(3): 1-3.
- [11] 刘广琼.色级统计地图分区亮度视错觉纠偏模型[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
LIU G Q. Correction model of partitioned luminance visual illusion on color level statistical map [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [12] BERTALMIO M, CALATRONI L, FRANCESCHI V, et al. Visual illusions via neural dynamics: wilson-cowan-type models and the efficient representation principle[J]. J Nephropathol, 2020, 123(5): 1606-1618.
- [13] 周昊天,傅小兰.认知科学—新千年的前沿领域[J]. 心理科学进展, 2005, 13(4): 388-397.
ZHOU H T, FU X L. Cognitive science: the frontier of the new millennium[J]. Progress in Psychological Science, 2005, 13(4): 388-397.
- [14] 孔斌.人类视觉与计算机视觉的比较[J]. 自然杂志, 2002, 23(1): 51-55.
KONG B. Comparison of human vision and computer vision [J]. Nature Journal, 2002, 23(1): 51-55.
- [15] 宗嘉婷,晋洁芳.视错觉在展示空间设计中的应用分析[J]. 设计, 2019, 32(11): 49-51.
ZONG J T, JIN J F. Application analysis of visual illusion in display space design [J]. Design, 2019, 32(11): 49-51.
- [16] 张艳萍.视错觉艺术在视觉传达设计中的应用探析[J]. 大观, 2019, 5(11): 22-23.
ZHANG Y P. Analysis on the application of optical illusion art in visual communication design [J]. Mark, 2019, 5(11): 22-23.
- [17] 张媛媛.视错觉在交互式包装设计中的应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
ZHANG Y Y. Research on the application of optical illusion in interactive packaging design [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [18] 贺庆文.现代家具造型设计中的视错觉研究[J]. 包装工程, 2016, 37(16): 196-200.
HE Q W. Research on optical illusion in modern furniture modeling design [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(16): 196-200.
- [19] 谭嘉宁,罗方亮,张馨元,等.视觉刺激事件相关电位及其研究进展[J]. 中国法医学杂志, 2017, 32(1): 44-47.
TAN J N, LUO F L, ZHANG X Y, et al. Research progress of visual stimulus event-related potentials [J]. Chinese Journal of Forensic Medicine, 2017, 32(1): 44-47.
- [20] 樊瑞文,肖娟,柳金英,等.事件相关脑电位与功能磁共振成像融合技术在探索大脑认知功能中的应用研究进展[J]. 中国全科医学, 2016, 19(3): 352-355.
FAN R W, XIAO J, LIU J Y, et al. Research progress in the application of event-related brain potentials and functional magnetic resonance imaging in the exploration of brain cognitive function [J]. China General Practice Medicine, 2016, 19(3): 352-355.
- [21] QIU J, LI H, ZHANG Q, et al. The muller-lyer illusion seen by the brain: an event-related brain potentials study[J]. Biol Psychol, 2008, 77(2): 150-158.
- [22] KOBAYASHI Y, YOSHINO A, OGASAWARA T, et al. Topography of evoked potentials associated with illusory motion perception as a motion aftereffect[J]. Biol Psychol, 2002, 13(1): 75-84.
- [23] QIU J, WEI D, LI H, et al. The vase-face illusion seen by the brain: an event-related brain potentials study[J]. Int J Psychophysiol, 2009, 74 (1): 69-73.
- [24] KORNMEIER J, BACH M. The necker cube-an ambiguous figure disambiguated in early visual processing[J]. Vision Res, 2005, 45(8): 955-960.
- [25] KORNMEIER J, BACH M. EEG correlates of perceptual reversals in Boring's ambiguous old/young woman stimulus[J]. Perception, 2014, 43(9): 950-962.
- [26] 邹鑫,张猛,李伟,等.具有两个叉的三叉戟不可能图形加工的电生理基础:一项ERP的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33 (10): 165-171.
WU X, ZHANG M, LI W, et al. Electrophysiological basis of impossible graphics processing of trident with two forks: a study on ERP [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(10): 165-171.
- [27] LIAO S, SU Y, WU X, et al. The poggendorff illusion effect influenced by top-down control: evidence from an event-related brain potential study[J]. Neuroreport, 2011, 22(15): 739-743.
- [28] NATALIE M, TAMARYN M, MICHAEL J W, et al. The role of configural in the thatcher illusion: an ERP study[J]. Psychon Bull Rev, 2015, 22(2): 445-452.
- [29] YUN X, HAZENBERG S J, JACOBS R H, et al. The neural signature of the fraser illusion: an explorative EEG study on fraser-like displays [J]. Front Hum Neurosci, 2015, 9(2): 374.
- [30] 丁晓攀,俞秀梅,马剑虹,等.视错觉的事件相关电位研究[J]. 航

- 天医学与医学工程, 2008, 21(1): 70-72.
- DING X P, YU X M, MA J H, et al. Study on event related potential of visual error kinesthetic [J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2008, 21(1): 70-72.
- [31] 刘小军, 董选, 赵合庆, 等. 正常儿童汉字语义事件相关电位的研究 [J]. 中国临床心理学杂志, 2006, 14(1): 103-105.
- LIU X J, DONG X, ZHAO H Q, et al. Study on semantic event-related potentials of chinese characters in normal children [J]. Chinese Journal of Clinical Psychology, 2006, 14(1): 103-105.
- [32] DIEN J, SPENCER K M, DONCHIN E. Localization of the event-related potential novelty response as defined by principal components analysis [J]. Brain Res Cogn Brain Res, 2003, 17(3): 637-650.
- [33] VERLEGER R, JASKOWSKI P, WASCHER E. Evidence for an integrative role of P3b in linking reaction to perception [J]. J Psychophysiol, 2005, 19(3): 165-181.
- [34] ZHANG S, DU X, WU X, et al. Spatiotemporal cortical activation underlies the müller-lyer illusion: an event-related potentials study [J]. Neuroreport, 2013, 24(17): 956-961.
- [35] MESTRY N, MENNEER T, WENGER M J, et al. Identifying sources of configural in three face processing tasks [J]. Front Psycho, 2012, 3(15): 456.
- [36] DONNELLY N, CORNES K, MENNEER T. An examination of the processing capacity of features in the thatcher illusion [J]. Atten Percept Psychophys, 2012, 74(7): 1475-1487.
- [37] PITTS M A, NERGER J L, DAVIS T J. Electrophysiological correlates of perceptual reversals for three different types of multistable images [J]. J Vis, 2007, 7(1): 6.
- [38] KORNMEIER J, BACH M. The necker cube-an ambiguous figure disambiguated in early visual processing [J]. Vision Res, 2005, 45(8): 955-960.
- [39] WEIDNER R, FINK G R. The neural mechanisms underlying the müller-lyer illusion and its interaction with visuospatial judgments [J]. Cereb Cortex, 2007, 17(4): 878-884.
- [40] NI A M, MURRAY S O, HORWITZ G D. Object-centered shifts of receptive field positions in monkey primary visual cortex [J]. Curr Biol, 2014, 24(14): 1653-1658.
- [41] ZEKEI S. The neurology of ambiguity [J]. Conscious Cogn, 2004, 13(1): 173-196.
- [42] HASSON U, HENDLER T, BEN BASHAT D, et al. Vase or face? A neural correlate of shape-selective grouping processes in the human brain [J]. J Cogn Neurosci, 2001, 13(6): 744-753.
- [43] MULERT C, MENZINGER E, LEICHT G, et al. Evidence for a close relationship between conscious effort and anterior cingulate cortex activity [J]. Int J Psychophysiol, 2005, 56(1): 65-80.
- [44] CHOI J W, KIM K, LEE J H. The influence of attention toward facial expressions on size perception [J]. Psychol Forsch, 2016, 80(1): 69-75.
- [45] MOORE C M, ENNS J T. Object updating and the flash-lag effect [J]. Psychol Sci, 2004, 15(12): 866-871.
- [46] LÜTTKE C S, EKMAN M, VAN GERVEN M A, et al. McGurk illusion recalibrates subsequent auditory perception [J]. Sci Rep, 2016, 6(9): 32891.
- [47] YANG W, YANG J, GAO Y, et al. Effects of sound frequency on audiovisual integration: an event-related potential study [J]. PLoS One, 2015, 10(9): e0138296.

(编辑:陈丽霞)