

体育运动对视觉工作记忆表征精度影响研究进展

陶浩德,邱达明

(江西师范大学 体育学院,江西 南昌 330022)

摘要:以运动促进认知为出发点,总结体育运动改善视觉工作记忆表征精度的理论和实践依据,为未来进一步揭示运动对视觉工作记忆表征精度的作用机制提供参考。视觉工作记忆是对视觉信息进行短暂储存加工的系统,与个体认知密切相关。表征精度作为评价视觉工作记忆能力的重要指标,反映对刺激信息的精确程度受到注意、容量、负荷、负性情绪的影响。立足脑神经与认知科学的研究,体育运动可以通过增加脑源性神经营养因子和促进大脑结构与功能可塑性来改善视觉工作记忆表征精度。不同类型的运动,如开放式运动和闭锁式运动,对视觉工作记忆表征精度的影响不同,但具体的作用机制仍需要不断探索。未来研究需要关注时程性更强的脑成像技术、更具生态学效度的测试程序、运动剂量关系以及神经递质作用机制等方面。

关键词:体育运动;视觉工作记忆;表征精度;脑机制

中图分类号:G804.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-983X(2025)02-0060-07

DOI:10.20185/j.cnki.1003-983X.2025.02.011

Research Progress on the Impact of Sports on Visual Working Memory Representation Accuracy

TAO Haode, QIU Daming

(Jiangxi Normal University, College of Physical Education, Nanchang Jiangxi, 330022)

Abstract: Taking exercise for cognition as the starting point, it summarize the theoretical and practical bases of sports to improve the precision of visual working memory representations, and provide references for further revealing the mechanism of exercise's effect on the precision of visual working memory representations in the future. Visual working memory is a system for transient storage and processing of visual information, which is closely related to individual cognition. Representation accuracy, as an important index for evaluating the ability of visual working memory, reflects that the degree of accuracy of the stimulus information is influenced by attention, capacity, load, and negative emotion. Grounded in brain neuroscience and cognitive science, sports can improve visual working memory representation accuracy by increasing brain-derived neurotrophic factors and promoting brain structural and functional plasticity. Different types of exercise, such as open-ended and closed-ended exercise, have different effects on visual working memory representation accuracy, but the specific mechanisms of action still need to be continuously explored. Future research needs to focus on more time-course brain imaging techniques, more ecologically valid testing procedures, exercise dose relationships, and neurotransmitter mechanisms of action.

Keywords: physical exercise; visual working memory; representation accuracy; brain mechanism

视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)是对视觉信息进行短暂储存加工的系统,是进行学习、语言、推理等高级认知活动的重要基础^[1]。大量的研究发现视觉工作记忆这一认

知资源是非常有限的,在容量上通常为 3~4 个组块,且仅用于当前的信息加工^[2]。对这种存在记忆资源上限的现象,研究者提出了离散插槽模型^[3](Slot-Based Model)和灵活资源模型^[4](Flexible Resource Model)。

针对视觉工作记忆的研究,大部分的研究者更倾向对储存容量的关注。但是,实际生活中视觉信息不仅仅是单一维度,还可能包含其他不同维度的信息而对目标信息的储存和维持产生影响^[5]。Luck 和 Vogel^[6]通过变化觉察实验发现,无论是单一维度还是多维度的记忆任务中,记忆项目数量的增加并不会改变视觉工作记忆的容量,而可能影响信息表征的准确性。因此研究者们将表征精度引入作为对视觉工作记忆

收稿日期:2024-08-29

基金项目:江西省教育厅研究生创新基金项目资助(YC2024-S228)。

第一作者简介:陶浩德(2000~),男,江西南昌人,在读硕士,研究方向:运动认知。

通讯作者简介:邱达明(1970~),男,江西万安人,硕士,副教授,研究方向:体育心理学,E-mail:lovepoppy@126.com。

能力的评价体系^[7]。“表征精度”这一指标的出现,将与“储存容量”分别从“质”和“量”两个方面对个体视觉工作记忆进行更准确的评价^[8]。

表征精度反映了视觉工作记忆中的表征相对于刺激信息的精准程度^[9]。其精度的高低与个体注意控制以及信息的维持都有密切的联系,因此国内外专家尝试通过对工作记忆训练以及其他对策提高个体的视觉工作记忆表征精度^[10]。目前越来越多的研究证明^[11],体育运动视觉工作记忆的益处,这为个体认知发展给出了新的方案,身体锻炼具有门槛低,成本效益高等优势。但是身体锻炼对视觉工作记忆表征精度的研究尚不清楚,不同运动类型的锻炼对表征精度的作用机制,以及神经变化等一系列问题仍需要不断探索。基于此,将视觉工作记忆表征精度以及体育锻炼对视觉工作记忆影响的相关文献进行系统梳理和总结,为推进该领域的研究提供新思路。

1 视觉工作记忆表征精度的影响因素

1.1 注意

注意与工作记忆一样是认知加工的重要部分^[12],日常生活中存在着大量的信息,不可能将所有的信息储存和表达。如何高效的记录信息,并完成一系列认知活动,与视觉工作记忆对信息的记录和表征有着密切的关系。视觉工作记忆的表征实际上就是对目标信息的保持的同时对无关信息的抑制的过程,而注意的过程同样也是对目标信息的选择,二者均反映了个体对目标信息的指向^[13-14]。大量学者认为^[15],视觉工作记忆对客体信息的选择和储存是通过注意来完成的。

在视觉工作记忆对信息加工的过程中,注意的选择可以发生在信息的编码和维持阶段。在视觉工作记忆编码阶段调用的是外部注意,是对外界客体的特征、位置等基本信息进行选择^[16-17]。Kerzel 和 Witzel^[18]发现,在目标搜索任务中干扰项和目标项均会被注意捕获,但位置线索会促进注意的引导从而提高记忆表征的精度。车晓玮等人^[19]也发现了相同现象,目标搜索任务记忆项匹配的干扰项诱发的 N2 大于不匹配的干扰项;目标项诱发的 N2pc 小于不匹配的干扰项。证明视觉工作记忆表征精度会影响注意引导,工作记忆表征消耗的的认知资源增加,搜索目标获得的资源减少,干扰项捕获的注意增加。

而在记忆的维持阶段,注意也会影响记忆的表征。此时调用的是内部注意,注意可以对已存储在视觉工作记忆中的信息进行选择和抑制,并引导信息的表征^[20]。有学者认为注意的选择可以根据任务的不同而变化^[21],这与灵活资源模型的理论类似,并且记忆资源的分配会受到表征精度的影响。另一部分学者不认同将注意看成一种资源分配,而是一种信息的竞争。Desimone 等人^[22]提出了偏向竞争模型(Bias Competition Model),认为出现在视野范围内的所有信息都在相互竞争注意,当目标信息凸显时,注意会自动将其捕捉并记录到工作记忆当中。而目标信息不凸显时,大脑会对目标信息的特征进行加工并保存到工作记忆中,用来区分和抑制干扰信息。这是一种由外部刺激自下而上的注意选择与内部自上而下注意加工的共同作用^[23]。因此注意能更好的将认知资源引导到需要记忆的维持的项目上,提高记忆的表征的精度。

1.2 容量

研究者们发现在变化觉察任务中被试能记住 3~4 个项目^[2],超过此上限,被试的正确率不会发生变化。Luck 和 Vogel 发现^[6],无论是单一维度还是不同维度的数量增加均不会影响储存容量的大小,其结果似乎证明了插槽模型,认为视觉工作记忆的存储方式是按照项目数量决定的^[24]。而其他的研究者却发现不同的结果,Wheeler 和 Treisman^[25]使用双色块嵌套模型的变化觉察范式发现,双色块的正确率要显著低于单色块,表明同一维度特征数量的增加会影响记忆的表征,这又与灵活资源模型的结论一致^[26]。后续研究发现^[27-28]多特征物体的精度需求不会影响容量分配,但客体的复杂度会影响信息的储存。

由于复杂刺激相对于简单刺激包含更多的信息,从而导致记忆资源在数量和精度上的权衡,在多特征记忆数量增加时会降低回忆精度^[29-30]。Machizawa 等人^[31]的脑电结果发现,记忆数量和精度的提高均会引起 CDA 振幅的增强。但只有记忆数量较少时,提高精度会引起 CDA 振幅的增强。因此可以发现,视觉工作记忆存储多特征信息的代价是以损失精度来达成。Vellage 等人^[32]使用连续延迟估计任务比较在不同难度下视觉工作记忆容量的高低是否会影响表征精度。发现高容量个体无论在什么情况下都能有更好的精度表现,其似乎有更多可以分配的内存资源,不会因为精度牺牲容量^[33]。

1.3 负荷

由于认知资源的有限性,记忆负荷的变化势必会对记忆的表征产生影响。Lavie 等人^[34]提出了知觉负荷理论,并逐步完善成了广泛认同的负荷理论,他们将负荷分为知觉负荷和认知控制负荷,二者共同构成了工作记忆负荷^[35]。该理论认为在低知觉负荷的情况下,即目标信息未达到认知资源上限时,多余的认知资源会继续对无关项目进行加工从而对记忆表征产生影响,使得表征精度下降产生干扰效应^[36]。当目标信息超过认知资源上限时,将不会对干扰信息进行加工,即不会产生干扰效应。而认知控制负荷则与其恰好相反,在高认知控制负荷下会对记忆的表征产生更大的干扰^[37-38]。在认知负荷较低的情况下,尽管目标刺激和干扰刺激均能被察觉到,但记忆资源能够主动地抑制无关信息的干扰^[39-40]。然而,在认知负荷较高的情况下,由于缺乏额外的认知资源来维持自上而下的、以目标为导向的加工过程,因此无法有效地抑制无关刺激的干扰^[41-42]。刘志英等人^[43]使用颜色回忆任务探讨干扰对精度的影响,共设置了 2、4、6 三种不同负荷的记忆任务。研究发现,在低记忆负荷时干扰项对表征精度产生影响,但容量不受到影响;在中等或高记忆负荷的情况下,干扰影响容量,但精度不受到影响。此外,我们也能用离散插槽模型的理论来解释,当客体数量低于插槽的数量,多余的插槽就会被干扰信息填满,出现干扰效应^[44]。但在低认知控制负荷时,即不存在干扰信息,多余的插槽就会表征同一个客体,使得表征精度上升^[45-46]。

1.4 负性情绪

负性情绪是一种消极的情绪,这种情绪可以是一种反应,也可以是一种状态。情绪会占据我们的认知资源,不同的情绪会对认知活动造成不同的影响^[47]。有相关研究发现,负性情绪状态与视觉工作记忆目标储存的数量和质量存在联系^[48-49]。在 Xie 和 Zhang 的实验中发现^[50],负性情绪状态可以提高视觉工作记忆表征精度,即负性情绪会对视觉工作记忆产生积极的

影响。但在后续的研究中发现,负性情绪会限制视觉工作记忆的信息数量。Figueira 等人^[51]借助 ERP 技术发现与中性情绪相比,负性情绪下的 CDA 的幅值更低,表明视觉工作记忆的储存数量更少。并且存在特质焦虑的被试更容易受到负性情绪的影响。在龙芳芳的实验中^[52],也发现了相同的结论,认为负性情绪会影响视觉工作记忆加工的资源分配,通过降低记忆数量提升表征精度。另外有研究者从负性情绪状态的脑区活动入手,发现负性情绪的刺激会使大脑前额叶皮层的激活程度增强^[53]。这与前额叶皮层在认知控制中的作用一致,从而提高对无关信息的过滤,表明负性情绪可能通过增强认知控制来提高视觉工作记忆表征精度。

2 改善视觉工作记忆表征精度的相关研究

视觉工作记忆表征精度反映了对信息保持的能力,对个体认知和执行功能具有重要意义。研究发现,个体的视觉工作记忆表征的能力可以通过训练得到改善,因此国内外专家尝试如何通过对工作记忆的训练和其他对策来改善和提高个体的视觉工作记忆表征精度^[54]。视觉工作记忆表征是一个复杂的认知过程,需要多个脑区共同完成^[55-56]。记忆编码的准确性由视觉皮层的激活程度和注意资源的分配共同影响;记忆的维持和提取则是依靠大脑额—顶叶皮层网络与海马体之间的神经联系^[57]。因此要改善个体视觉工作记忆表征精度,需要考虑记忆表征过程的神经机制,并以此针对性的提出训练方案。在认知心理学领域对视觉工作记忆以及表征精度的训练主要包括:N-back 记忆游戏程序训练、视觉搜索任务、认知反应任务等^[58-59]。大量研究表明,此类任务可以通过增强记忆任务的迁移,以及强化记忆相关高级认知活动的脑区与视觉皮层之间存在联系增强对信息进行储存自上而下的调控^[60]。

2.1 运动改善视觉工作记忆的相关理论及实证研究

除了心理学领域的训练能改进视觉工作记忆表征精度以外,目前越来越多的研究发现,体育运动与认知活动之间存在着密切的联系,可能以此作为改善视觉工作记忆表征精度的依据和方案^[61]。

脑神经营养因子假说:体育运动可以通过增加大脑活性物质含量,神经突触传递速率提高,使细胞血流环境得到改善,为大脑提供更多的营养物质,均能为个体认知带来增益。其中与记忆高度相关的是脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF),主要表达场所在海马体。同时 BDNF 也能作用于细胞内部的生化反应,从而引起神经突触结构体积的增加^[62-63]。VAN 等人^[64]发现小鼠海马体神经营养蛋白水平在有氧运动后有显著提高。Neeper 等人在实验中发现海马体中的 BDNF 含量与身体活动水平呈正相关^[65]。并在后续实验中对不同运动时间海马体的 BDNF 水平,无论是几天的短期运动还是超过 3 个月的长期运动 BDNF 水平均有显著提高,并且在结束后一段时间内依然能保持较高水平。另外运动强度也会影响 BDNF 水平^[66],急性高强度的运动能快速引发 BDNF 浓度升高,但会在 20-50 min 恢复正常水平^[67]。

功能可塑性假说是体育运动可以使大脑在结构和功能上出现的可塑性变化^[68]。研究者通过解剖学和各种医学影像技术发现体育运动能诱导海马体体积和血管系统的结构变化^[69-70],

同时还能使与人体高级认知有关的脑区激活程度和神经连接增强^[71]。有研究发现^[61],大脑在进行认知活动和运动任务时,在前额叶皮层、基底核以及小脑中发现了重叠的神经活动,并且视觉工作记忆表征精度与额—顶叶网络中的功能更相关,提示存在共享的神经资源募集^[72-73]。这表明身体活动可以使视觉工作记忆相关脑区的神经联系增强,提高认知表现。个体视觉工作记忆存储容量与左侧枕叶皮层(IPS)的灰质体积相关,而精确度与右侧 IPS 的灰质体积相关^[74]。通过对大脑形态学研究发现体育运动能增加大脑扣带回灰质的体积,同时增强额—顶叶活动水平,这些大脑结构与功能上的变化与视觉工作记忆表征精度有密切的关系。

为了探索运动改善视觉工作记忆的作用机制,研究者们通过对不同记忆阶段以及作用效果开展研究。娄莹等^[75]人采用改良版的变化觉察范式探讨身体活动水平与视觉工作记忆的关系,发现高活动水平的个体反应时和准确率均更高。ERP 结果显示在记忆编码阶段的 Alpha 振荡能量更大,且在额顶区诱发了 N2 和 P3 更高的振幅,提示在记忆过程中调用了更多资源^[76]。在一项关于有氧运动的干预研究中^[77],研究者借助影像学技术发现,在进行 6 周有氧运动干预可以使后顶叶皮层区域同质性降低的同时体积增加。并且伴随扣带、颞叶、顶叶和枕叶区域的功能连接增强,提示我们有氧运动可以增加工作记忆表现,提高认知水平。另外相关研究发现^[78],长期锻炼习惯和视觉工作记忆表征精度之间存在高度相关这也为改善视觉工作记忆表征精度给出了新的方案。

2.2 不同运动类型对视觉工作记忆表征精度的影响

目前已有大量的研究能证明体育运动对视觉工作记忆有促进作用,此有益影响可能是通过提高视觉工作记忆表征的精确性。然而,关于什么类型的体育运动可能更有效地改善个体视觉工作记忆的功能和提高表征精度,仍然存在一些争议。个体在进行不同类型的运动过程中,由于运动技能自身独特的属性,对视觉工作记忆的表征产生不同的健康效应^[79]。

在一项对比专业乒乓球运动员与非专业运动员的视觉—空间认知任务中^[80],专业乒乓球运动员任务反应时更短,脑区功能协调性更好,魏瑶的实验也发现了相同的结论^[81]。同时有研究者发现通过开放式运动技能干预能增强外侧前额叶和额极区的激活程度,并且在视觉空间任务的表现也要优于闭锁式运动技能干预的被试^[82-83]。进行开放式运动技能时,变化的、不可预测的运动环境是促进脑认知发展的理想场所,在复杂情境中有效提取外部刺激信息,排除干扰信息以应对冲突事件,不断强调个人使用视觉/空间信息的能力,进行快速的决策和反应,以增强对外界信息表征的准确性。使得能将注意力集中在主要的任务上,同时抑制出现的无关信息从而调控记忆资源对主要任务进行表征,以提高信息表征的精度。

有研究发现,工作记忆的不同成分(如维持和操纵)以及不同刺激模式(如语言和视觉—空间)对锻炼的敏感度均不相同,其中复杂的协调性运动可以促进前额叶皮层增强对视觉信息的处理能力^[61,84]。而 20 min 耐力锻炼可以提高神经生长因子(如 BDNF)的水平来提升工作记忆^[85],与此同时 HIIT 运动也能改善个体记忆以及注意功能^[86]。王素等人^[87]发现进行中高强度的协调闭锁式运动可以显著提高 2N-back 任务的正确率,表现为回忆精度更高。闭锁式运动技能改善信息表征的

维持阶段,在内部调控过程中,增强目标信息保持,同时抑制无关信息的干扰效应。闭锁式运动技能虽然是在相对稳定的环境下进行,但是需要运动者自身各个器官组织进行协调,在工作记忆内部维持目标相关信息,如任务要求和需要再现的演示动作序列,根据不同的任务要求调整信息的表征^[88]。

综上,体育运动能够促进视觉工作记忆并提高其表征的精确性,但不同类型的运动对这一功能的影响存在差异。开放式运动技能如乒乓球能提升视觉—空间认知能力和信息表征的准确性,而闭锁式运动技能则有助于改善信息表征的维持阶段,提高回忆精度。并且,不同工作记忆成分和刺激模式对运动的敏感度不同,复杂的协调性运动和耐力锻炼都能以不同方式提升工作记忆功能,关于运动类型的选择,应考虑个体的具体需求。

3 总结

视觉工作记忆对我们日常的学习和生活以及认知决策都具有重要的作用。本文梳理了体育运动对视觉工作记忆表征精度及其脑机制的相关研究。众多脑科学的证据均表明体育运动可以提高脑源性营养物质的活性,增强认知相关脑区的神经连接和激活,从而提高注意力、改善记忆、促进认知发展。并且不同的运动对视觉工作记忆的增益是不同的,这为体育运动提升大脑功能效益提供了科学依据。但是不同运动方式是否通过影响视觉工作记忆表征精度从而对个体认知产生增益,以及运动对信息表征过程影响的脑机制仍然不清楚,需要更多的研究证实。

4 研究展望

随着认知神经科学的发展,体育运动对视觉工作记忆表征精度的影响及其脑机制的研究有了很大的进展,但是在运动对记忆表征过程的影响研究还知之甚少。未来的研究中,不仅要在研究技术和手段上不断创新,还需要立足不同运动特点深入研究对表征精度的影响,进一步探索其脑神经机制。

第一,目前的研究更多的是关注脑区定位、激活以及行为表现的结果^[89-90],虽然这些方法能揭示不同脑区与行为上的联系,但是其在时程分辨率上较差^[91]。在之后的研究中需借助时程性更强的脑磁图、ERP等时间分辨率较高的技术分析记忆表征的动态过程^[92]。

第二,以往视觉工作记忆表征精度研究常用的测试范式有:变化觉察范式、颜色回忆范式、视觉搜索范式等。选用的客体信息主要是:颜色、位置、形状,极少数研究会采用包含生物运动信息的工作记忆表征,缺乏动作信息表征的研究。由于在运动干预的过程中,被试需要处理的大部分信息来自动作信息,因此大脑受到动作信息的刺激要强于其他信息来源^[93]。而工作记忆的训练存在迁移,所以有必要根据运动项目的设计具有生态学效度的测试程序,研究动作信息对视觉工作记忆表征的引导特点和作用机制^[94]。

第三,运动锻炼干预除了项目的选择,剂量关系(强度、频率、时间)也是研究者们一直关注的问题。目前的研究发现,中等强度运动对改善视觉工作记忆的效果是最佳的,而在不同频率和不同持续时间的结论却不尽相同^[95-96]。因此,在今后的研究中要不断深入对剂量关系选择及其交互作用的探讨。

第四,体育锻炼对视觉工作记忆表征精度在神经递质方面的作用机制仍不清楚。在未来的研究中,可以从神经递质层面入手,深入研究体育锻炼对体液调节对视觉工作记忆表征精度的作用,以及不同神经递质之间的交互影响。例如,多巴胺、血清素等与记忆和认知相关的作用机制^[97-98]。

参考文献:

- [1] COWAN N. Working Memory Underpins Cognitive Development, Learning, and Education[J]. *Educational Psychology Review*, 2014, 26(2): 197-223.
- [2] LUCK S J, VOGEL E K. The capacity of visual working memory for features and conjunctions[J]. *Nature*, 1997, 390(6657): 279-281.
- [3] VOGEL E K, MCCOLLOUGH A W, MACHIZAWA M G. Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory[J]. *Nature*, 2005, 438(7067): 500-503.
- [4] WILKEN P, MA W J. A detection theory account of change detection[J]. *Journal of Vision*, 2004, 4(12): 11.
- [5] ZHANG W, LUCK S J. The Number and Quality of Representations in Working Memory[J]. *Psychological Science*, 2011, 22(11): 1434-1441.
- [6] LUCK S J, VOGEL E K. Visual working memory capacity: from psychophysics and neurobiology to individual differences[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2013, 17(8): 391-400.
- [7] MA W J, HUSAIN M, BAYS P M. Changing concepts of working memory[J]. *Nature Neuroscience*, 2014, 17(3): 347-356.
- [8] 张照,张力为,龚然.视觉工作记忆的过滤效能[J].*心理科学进展*, 2021, 29(4): 635-651.
- [9] FUKUDA K, AWH E, VOGEL E K. Discrete capacity limits in visual working memory[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2010, 20(2): 177-182.
- [10] LAINE M, FELLMAN D, WARIS O, et al. The early effects of external and internal strategies on working memory updating training[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4045.
- [11] ZHU H, CHEN A, GUO W, et al. Which Type of Exercise Is More Beneficial for Cognitive Function? A Meta-Analysis of the Effects of Open-Skill Exercise versus Closed-Skill Exercise among Children, Adults, and Elderly Populations[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 134-151.
- [12] HU Y, ALLEN R J, BADDELEY A D, et al. Executive control of stimulus-driven and goal-directed attention in visual working memory[J]. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2016, 78(7): 2164-2175.
- [13] BERGGREN N, EIMER M. Object-based target templates guide attention during visual search[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2018, 44(9): 1368-1382.
- [14] 胡艳梅,张明.基于记忆的注意捕获和注意抑制效应:ERP证据[J].*心理学报*, 2016, 48(1): 12-21.
- [15] 张学民,舒华,高薇.视觉选择性注意加工的优先效应与加工模式[J].*心理科学*, 2003(2): 358-359.
- [16] ARNICANE A, SOUZA A S. Assessing the robustness of feature-based selection in visual working memory[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2021, 47(5): 731-758.

- [17] 张豹,邵嘉莹,胡岑楼,等.工作记忆表征的激活与抑制状态对注意引导效应的影响[J].心理学报,2015,47(9):1089-1100.
- [18] KERZEL D, WITZEL C. The allocation of resources in visual working memory and multiple attentional templates[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2019, 45(5): 645-658.
- [19] 车晓玮,徐慧云,王凯旋,等.工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响[J].心理学报,2021,53(7):694-713.
- [20] 付凯,王天昊,梁腾飞,等.视觉工作记忆中的内部注意选择:效果、特性及机制[J].心理科学,2020,43(6):1333-1340.
- [21] KLYSZEJKO Z, RAHMATI M, CURTIS C E. Attentional priority determines working memory precision[J]. Vision Research, 2014, 10(5): 70-76.
- [22] DESIMONE R, DUNCAN J. Neural Mechanisms of Selective Visual Attention[J]. Annual Review of Neuroscience, 1995, 18(1): 193-222.
- [23] BECK V M, HOLLINGWORTH A. Competition in saccade target selection reveals attentional guidance by simultaneously active working memory representations[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2017, 43(2): 225-230.
- [24] ANDERSON D E, VOGEL E K, AWH E, et al., Precision in Visual Working Memory Reaches a Stable Plateau When Individual Item Limits Are Exceeded[J]. Journal of Neuroscience, 2015, 35(34): 12081-12081.
- [25] WHEELER M E, TREISMAN A M. Binding in short-term visual memory[J]. Journal of Experimental Psychology: General, 2002, 131(1): 48-64.
- [26] BOYNTON G M, CIARAMITARO V M, ARMAN A C. Effects of feature-based attention on the motion aftereffect at remote locations [J]. Vision Research, 2006, 46(18): 2968-2976.
- [27] 黎翠红,何旭,郭春彦.多特征刺激在视觉工作记忆中的存储模式[J].心理学报,2015, 47(6):734-745.
- [28] 何旭,郭春彦.视觉工作记忆的容量与资源分配[J].心理科学进展,2013,21(10): 1741-1748.
- [29] AWH E, BARTON B, VOGEL E K. Visual Working Memory Represents a Fixed Number of Items Regardless of Complexity[J]. Psychological Science, 2007, 18(7): 622-628.
- [30] FOUNGIE D, ASPLUND C L, MAROIS R. What are the units of storage in visual working memory? [J]. Journal of Vision, 2010, 10(12): 27-27.
- [31] MACHIZAWA M G, GOH C C W, DRIVER J. Human Visual Short-Term Memory Precision Can Be Varied at Will When the Number of Retained Items Is Low[J]. Psychological Science, 2012, 23(6): 554-559.
- [32] VELLAGE A K, MÜLLER P, SCHMICKER M, et al. High Working Memory Capacity at the Cost of Precision? [J]. Brain Sciences, 2019, 9(9): 210.
- [33] YE C, ZHANG L, LIU T, et al. Visual Working Memory Capacity for Color Is Independent of Representation Resolution [J]. PLoS ONE, 2014, 9(3): e91681.
- [34] LAVIE N. Attention, Distraction, and Cognitive Control Under Load[J]. Current Directions in Psychological Science, 2010, 19(3): 143-148.
- [35] LAVIE N. Attention, Distraction, and Cognitive Control Under Load[J]. Current Directions in Psychological Science, 2010, 19(3): 143-148.
- [36] KONSTANTINOU N, BEAL E, KING J R, et al. Working memory load and distraction: dissociable effects of visual maintenance and cognitive control[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2014, 76(7): 1985-1997.
- [37] 姚乃垠.视觉工作记忆负荷对选择性注意的影响[D].浙江大学, 2022.
- [38] ZHANG W, LUCK S J. Opposite effects of capacity load and resolution load on distractor processing[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2015, 41(1): 22-27.
- [39] 李培.工作记忆干扰抑制的神经振荡机制[D].华东师范大学, 2019.
- [40] BARTH A, SCHNEIDER D. Manipulating the focus of attention in working memory: Evidence for a protection of multiple items against perceptual interference[J]. Psychophysiology, 2018, 55(7): e13062.
- [41] 尤日虹.视觉工作记忆中不同记忆负荷下回溯线索的认知神经机制[D].辽宁师范大学, 2021.
- [42] MCCOLLOUGH A W, MACHIZAWA M G, VOGEL E K. Electrophysiological Measures of Maintaining Representations in Visual Working Memory[J]. Cortex, 2007, 43(1): 77-94.
- [43] 刘志英.注意方式对工作记忆抗干扰能力的影响[D].华东师范大学,2018.
- [44] 王思思.视觉工作记忆的存储和干扰抑制的神经机制[D].华东师范大学,2020.
- [45] HE X, ZHANG W, LI C, et al. Precision requirements do not affect the allocation of visual working memory capacity[J]. Brain Research, 2015, 16(2): 136-143.
- [46] MYERS N E, CHEKROUD S R, STOKES M G, et al. Benefits of flexible prioritization in working memory can arise without costs[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2018, 44(3): 398-411.
- [47] KISSLER J, HERBERT C, PEYK P, et al. Buzzwords: Early Cortical Responses to Emotional Words During Reading[J]. Psychological Science, 2007, 18(6): 475-480.
- [48] MALJKOVIC V, MARTINI P. Short-term memory for scenes with affective content[J]. Journal of Vision, 2005, 5(3): 6.
- [49] 罗思晨.情绪影响视觉空间工作记忆容量和精度的认知神经机制:来自行为和近红外成像技术的证据[D].浙江师范大学,2018.
- [50] XIE W, ZHANG W. Negative emotion boosts quality of visual working memory representation[J]. Emotion, 2016, 16(5): 760-774.
- [51] FIGUEIRA J S B, OLIVEIRA L, PEREIRA M G, et al. An unpleasant emotional state reduces working memory capacity: electrophysiological evidence[J]. Social Cognitive and Affective Neuroscience, 2017, 12(6): 984-992.
- [52] 龙芳芳.负性情绪状态对视觉工作记忆资源分配及过滤效率的影响[D].辽宁师范大学, 2019.
- [53] PHELPS E A, LING S, CARRASCO M. Emotion Facilitates Perception and Potentiates the Perceptual Benefits of Attention [J]. Psychological Science, 2006, 17(4): 292-299.
- [54] 赵鑫,周仁来.工作记忆训练:一个很有价值的研究方向[J].心理科学进展,2010,18(5):711-717.
- [55] ZHAO Y, KUAI S, ZANTO T P, et al. Neural Correlates Underlying the Precision of Visual Working Memory[J]. Neuroscience, 2020, 42(5): 301-311.
- [56] VOGEL E K, MACHIZAWA M G. Neural activity predicts individ-

- ual differences in visual working memory capacity[J]. *Nature*, 2004, 428(6984): 748–751.
- [57] TODD J J, MAROIS R. Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex[J]. *Nature*, 2004, 428(6984): 751–754.
- [58] 杨静,何昊,张星星,等.不同工作记忆训练对认知功能及相关脑电特征的影响[J].*中国心理卫生杂志*, 2021, 35(7): 599–605.
- [59] 赵鑫,杨婷,王天翼,等.任务结构相似性对工作记忆训练迁移效应的影响[J].*心理科学*, 2022, 45(6): 1337–1343.
- [60] RAINER G, ASAAD W F, MILLER E K. Selective representation of relevant information by neurons in the primate prefrontal cortex[J]. *Nature*, 1998, 393(6685): 577–579.
- [61] LUDYGA S, GERBER M, KAMIJO K. Exercise types and working memory components during development[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2022, 26(3): 191–203.
- [62] BÉLANGER M, ALLAMAN I, MAGISTRETTI P J. Brain Energy Metabolism: Focus on Astrocyte–Neuron Metabolic Cooperation[J]. *Cell Metabolism*, 2011, 14(6): 724–738.
- [63] LIPSKY R H, MARINI A M. Brain-Derived Neurotrophic Factor in Neuronal Survival and Behavior-Related Plasticity[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2007, 1122(1): 130–143.
- [64] VAN PRAAG H, CHRISTIE B R, SEJNOWSKI T J, et al. Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999, 96(23): 13427–13431.
- [65] NEEPER S A, GÓAUCTEMEZ-PINILLA F, CHOI J, et al. Exercise and brain neurotrophins[J]. *Nature*, 1995, 373(6510): 109–109.
- [66] KNAEPEN K, GOEKINT M, HEYMAN E M, et al. Neuroplasticity–Exercise–Induced Response of Peripheral Brain–Derived Neurotrophic Factor: A Systematic Review of Experimental Studies in Human Subjects[J]. *Sports Medicine*, 2010, 40(9): 765–801.
- [67] PIEPMIEIER A T, SHIH C H, WHEDON M, et al. The effect of acute exercise on cognitive performance in children with and without ADHD[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2015, 4(1): 97–104.
- [68] DING Q, YING Z, GÓMEZ-PINILLA F. Exercise influences hippocampal plasticity by modulating brain-derived neurotrophic factor processing[J]. *Neuroscience*, 2011, 19(2): 773–780.
- [69] RAJAB A S, CRANE D E, MIDDLETON L E, et al. A single session of exercise increases connectivity in sensorimotor-related brain networks: a resting-state fMRI study in young healthy adults[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8(6): 625.
- [70] CHIRLES T J, REITER K, WEISS L R, et al. Exercise Training and Functional Connectivity Changes in Mild Cognitive Impairment and Healthy Elders[J]. *Journal of Alzheimer's Disease*, 2017, 57(3): 845–856.
- [71] KRONENBERG G, REUTER K, STEINER B, et al. Subpopulations of proliferating cells of the adult hippocampus respond differently to physiologic neurogenic stimuli[J]. *Journal of Comparative Neurology*, 2003, 467(4): 455–463.
- [72] 夏海硕,丁晴雯,庄岩,等.体育锻炼促进认知功能的脑机制[J].*心理科学进展*, 2018, 26(10): 1857–1868.
- [73] VOSS M W, VIVAR C, KRAMER A F, et al. Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2013, 17(10): 525–544.
- [74] MACHIZAWA M G, DRIVER J, WATANABE T. Gray Matter Volume in Different Cortical Structures Dissociably Relates to Individual Differences in Capacity and Precision of Visual Working Memory[J]. *CEREBRAL CORTEX*, 2020, 30(9): 4759–4770.
- [75] 姜莹,周成林,陆颖之.不同体力活动水平大学生的生物运动工作记忆加工特征研究[J].*首都体育学院学报*, 2020, 31(4): 364–369+384.
- [76] 姜莹.不同体力活动水平成年人生物运动工作记忆加工差异:一项ERP研究[D].上海体育学院, 2020.
- [77] JI L, ZHANG H, POTTER G G, et al. Multiple Neuroimaging Measures for Examining Exercise-induced Neuroplasticity in Older Adults: A Quasi-experimental Study[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2017, 9(5): 102.
- [78] YUAN X, LI D, HU Y, et al. Neural and behavioral evidence supporting the relationship between habitual exercise and working memory precision in healthy young adults[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2023, 17(4): 1146465.
- [79] KOCH P, KRENN B. Executive functions in elite athletes—Comparing open-skill and closed-skill sports and considering the role of athletes' past involvement in both sport categories[J]. *Psychology of Sport and Exercise*, 2021, 55(7): 101925.
- [80] 郭志平.乒乓球运动员在视觉空间认知加工中的神经效率及其神经机制[D].上海体育学院, 2018.
- [81] 魏瑶.乒乓球运动员在不同空间任务认知加工神经效率的EEG研究[D].上海体育学院, 2020.
- [82] 陶成.开放式和封闭式运动项目的大学生视觉空间工作记忆特征研究:来自fNIRS的证据[D].山东体育学院, 2022.
- [83] 吴浩东.开放与闭锁运动锻炼老年人视觉空间工作记忆不同成分的差异研究[D].上海体育学院, 2020.
- [84] CHEN A G, ZHU L N, YAN J, et al. Neural Basis of Working Memory Enhancement after Acute Aerobic Exercise: fMRI Study of Preadolescent Children[J]. *Frontiers in Psychology*, 2016(7): 1804.
- [85] CAO L, LIU X, LIN E J D, et al. Environmental and Genetic Activation of a Brain-Adipocyte BDNF/Leptin Axis Causes Cancer Remission and Inhibition[J]. *Cell*, 2010, 142(1): 52–64.
- [86] 樊春鹏. HIIT改善记忆及注意功能研究进展[J].*湖北体育科技*, 2020, 39(9): 822–825.
- [87] 王素.不同体育锻炼项目与锻炼强度对大学生工作记忆的影响[D].天津体育学院, 2022.
- [88] 王晋,石岩.基于运动技能分类的运动心理准备(英文)[J].*首都体育学院学报*, 2017, 43(3): 8–15.
- [89] LABAR K S, GITELMAN D R, PARRISH T B, et al. Neuroanatomic Overlap of Working Memory and Spatial Attention Networks: A Functional MRI Comparison within Subjects[J]. *NeuroImage*, 1999, 10(6): 695–704.
- [90] ZHANG H, HU Y, LI Y, et al. Neurovascular coupling in the attention during visual working memory processes[J]. *Science*, 2024, 27(4): 109368.
- [91] 库逸轩.工作记忆的认知神经机制[J].*生理学报*, 2019, 71(1): 173–185.
- [92] WANG D, ZHOU C, CHANG Y K. Acute exercise ameliorates craving and inhibitory deficits in methamphetamine: An ERP study[J]. *Physiology & Behavior*, 2015, 14(7): 38–46.