

认知增强技术改善流体智力的研究进展

林逸轩

西南大学心理学部, 重庆

收稿日期: 2022年2月25日; 录用日期: 2022年3月10日; 发布日期: 2022年3月17日

摘要

流体智力(GF)是人类认知的一个重要组成部分, 并且它与个体学术成就、收入和寿命等相关。这种重要性使得研究者不断尝试若干途径来提升这一能力。显然, 不同的认知增强技术(如: 认知训练, 无创脑刺激, 神经反馈等)以非常不同的方式影响大脑功能, 尽管争议颇多, 但无疑丰富了我们对认知增强机制和流体智力本质的理解。未来研究应立足于大样本, 开发行之有效且稳定的认知训练任务原型; 采用互补的研究手段和多样的分析技术来完善认知增强理论; 面向青少年脑智开发全新的教育认知工具, 考察流体智力提升带来的实际效应。

关键词

流体智力, 认知增强, 认知训练, 无创脑刺激, 神经反馈

Advances in Cognitive Enhancement Techniques to Improve Fluid Intelligence

Yixuan Lin

Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing

Received: Feb. 25th, 2022; accepted: Mar. 10th, 2022; published: Mar. 17th, 2022

Abstract

Fluid intelligence (GF) is an important component of human cognition, and it is related to individual academic achievement, income and life span. This importance has led researchers to try several ways to improve this ability. It is clear that different forms of cognitive enhancement (e.g., cognitive training, noninvasive brain stimulation, neurofeedback, etc.) affect brain function in very different ways and, despite much debate, have undoubtedly enriched our understanding of the mechanisms of cognitive enhancement and the nature of fluid intelligence. Future research should be based on large samples to develop effective and stable cognitive training task prototype;

using complementary research methods and various analytical techniques to improve cognitive enhancement theory; to develop a new educational cognitive tool for adolescent brain and investigate the practical effect of fluid intelligence enhancement.

Keywords

Fluid Intelligence, Cognitive Enhancement, Cognitive Training, Noninvasive Brain Stimulation, Neurofeedback

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

日常生活中，面对陌生场景所带来的挑战，我们能否成功发现并适应未知规则，极大地依赖于流体智力水平。流体智力专指个体通过抽象推理解决新奇问题的能力，与个体已有经验和技能无关[1]。流体智力是心理学中得到充分研究的科学概念，影响着学习、语言、数算和自我控制等多种认知表现[2]，并且与个人多方面的社会表现密切相关，如教育和职业成就[3] [4]，收入[5]，甚至寿命[6]。改善个体流体智力，在个体层面能够提升个人的社会功能；而放大到群体层面，则具有推动社会进步的重大意义。进一步，流体智力提升的心理与神经机制研究，有助于阐明高级认知功能的工作机理以及心理与大脑的因果性关联等心理学与神经科学中的重大科学问题。认知增强技术指的是，通过各种设备积极地影响大脑技能，从而改善个体认知表现的各项干预措施(例如认知训练，无创脑刺激，神经反馈等)。在过去二十年里，我们已经看到研究者们设计和实施旨在增强流体智力并减缓其在老年人中衰退的相关项目上付出了令人印象深刻的努力。虽然目前结果依然处于争议之中，但考虑到潜在的巨大收益，这仍然是吸引大众眼球的话题。

2. 认知训练提升流体智力

在现有的手段中，认知训练是最广泛使用的认知增强方法，采用认知训练的手段用以提升流体智力的研究呈现快速增长趋势，推动认知训练成为认知领域中的热点问题。研究者最为关注的，莫过于训练所带来的远迁移效应。远迁移效应是指对与训练任务存在明显差异的任务的迁移，如训练工作记忆提升流体智力。到目前为止，研究较多的认知训练项目，除了使用最多的工作记忆训练，还包括电子游戏训练、音乐训练以及象棋训练[7]。不过遗憾的是，不论何种类型，认知训练远迁移并没有表现出较高的可重复性，由此也受到了学者的颇多质疑。下面我们将逐一介绍不同认知训练项目改善流体智力的情况，以此更好地揭示其中的争议。

2.1. 工作记忆训练

“工作记忆训练有用吗？”在过去的20年里，这个问题被越来越多的研究者、家长、教育工作者、科学记者和对改善他们的心理功能感兴趣的消费者提出。这个想法很有吸引力——一个涉及信息维护和操作的认知训练，风险和时间承诺都很小，在学术行为和日常活动中便可产生理想的改善。由于目前工作记忆训练研究数量过于庞大，我们将以元分析为例来揭示其中争议。

Au 等人[8]回顾了20项使用n-back任务进行训练并且具有控制组的研究，总共涉及1000多名处于

18~50 岁的健康被试, 98 项流体智力表现。最终元分析结果显示, n-back 训练对流体智力的净效应虽然小但已显著($g = 0.24, P < 0.001$)。随后, Soveri 团队[9]首次采用多层次元分析手段, 再次考察 n-back 训练对健康成年人的影响程度。此次分析囊括 33 项研究, 涉及 2105 人, 507 个被试内前后比较样本, 共有 203 个迁移效果测试, 主要从流体智力和认知控制角度考察训练的远迁移效应。结果发现 n-back 训练对流体智力的效应量微小却显著($g = 0.16, P < 0.001$)。不过相反的, 也有多项涉及不同特征群体的元分析结果都否定了工作记忆训练的远迁移效应。例如有学者[10]筛选出 87 篇相关论文, 涉及全年龄段(7~80)被试, 并从多个能力维度考察训练的远迁移效应。结果与处理组相比, 训练组仅阅读理解能力显著增加($g = 0.15$), 但不存在长期性, 同时言语、非言语、字母编码和数算能力均无显著提高。此外, 有元分析[11]专门考察了工作记忆训练在健康儿童中的效应。研究选取 27 项设置有控制组的文献, 包涵 3~16 岁儿童 1601 名, 提升目标主要为数算能力、流体智力和认知控制。结果发现, 在远迁移上, 整体效应量微弱($g = 0.12, P < 0.001$), 而且只考虑具有主动对照组的随机样本效应量时, 总体效应几乎为零($g = 0.03, P = 0.521$)。此外, 也有元分析[12]综合了 27 项研究, 系统探讨了工作记忆训练在 1130 名健康老年人(年龄: $M = 69.5, SD = 4.9$)中的迁移效应。结果显示, 在推理能力方面, 工作记忆训练的提升效应只是边缘性显著($g = 0.10, P = 0.08$), 同时效应量受任务类型、训练时长和测量措辞的影响。

不过考虑到个体在迁移量上存在巨大差异, 并且两者在提升效应量上可能存在折扣, 以及较低水平个体在工作记忆训练中相比于高水平个体获益更多, 我们认为利用多个群组平均成绩对迁移效应进行考察的手段本身可能降低效应显著性。至于工作记忆训练是否有效, 和许多心理学问题一样, 答案不是简单的“是”或“不是”, 而是需要更细致地考虑不同研究之间的相似性和差异性, 以及每项研究的证据质量。

2.2. 电子游戏训练

自从 20 世纪 80 年代电子游戏在世界范围内传播以来, 它已经成为年轻人和成年人中最受欢迎的休闲活动之一。由于它们的社会相关性, 商业电子游戏对人类行为的影响是一个主要的兴趣话题。和其他认知训练活动一样, 玩电子游戏对认知能力的要求也很高。

有研究者曾定制了一款电子游戏, 发现个体电子游戏训练能够带来流体智力的提升[13]。随后的元分析也有类似结果[14], 结果显示, 在准实验中, 电子游戏训练能够带来更大且显著的远迁移效应, 但是真实验中提升效应却不显著。这可能的解释是, 准实验中的被试本身就有接触电子游戏的经验, 因此更容易投入到训练之中, 从而强化了自身固有能力。不过近五年来, 学者对电子游戏训练导致认知增强(至少在流体智力方面)的态度可能偏向否定。例如有研究建立了三个元分析模型($K_1 = 310, K_2 = 315, K_3 = 359$), 分别探讨了电子游戏技能与认知能力之间的相关性; 电子游戏玩家和非游戏玩家在认知能力上的差异; 电子游戏训练对参与者认知能力(包括流体智力)的影响。遗憾的是, 所有模型效应过小或者为零, 因此支持玩电子游戏与认知能力增强之间并不存在因果关系[15]。

2.3. 音乐训练和象棋训练

以往很多针对演奏乐器或下象棋孩子的测验, 他们在智商上的得分, 经常出现高于那些不会演奏乐器或下象棋孩子的结果。然而他们是真的受到训练从而智慧过人还是本身就天资聪颖呢?

有元分析发现, 经过音乐训练, 个体的流体智力确实出现了显著提升($d = 0.35$), 但是这个增强效应却是值得商榷的。他们还补充道, 在所选的文献中, 只有一篇设置了严格的积极对照组, 但该研究中效应量明显减小($d = 0.16$)。因此他们认为音乐训练的认知增强效应是和实验设置的严格程度呈反比。进一步, 他们更偏向于音乐训练并不能带来流体智力提升, 更多的是安慰剂效应[16]。与此同时, 双生子的研

究可能更加说明问题。有研究以 10,500 多对双胞胎为样本,采用同卵双胞胎控制设计和经典双胞胎模型相结合的方法,研究了音乐练习与智商之间的因果关系,以及潜在的遗传和环境影响。然而,当使用同卵双胞胎控制方法控制遗传和共享环境影响时,这种关系消失了,这表明训练有素的双胞胎并不比未经训练的双胞胎智商更高[17]。

与音乐训练类似,元分析发现个人智力技能的增加受到象棋训练时间调节,然而由于选取的文章中并没有一项研究采用了“理想设计”,包括前后测试、完全随机分配参与者,以及不做任何事的对照组和主动对照组,因此虽然结果成阳性,但是他们依然持有强烈的怀疑态度[18]。对此,他们紧接开展了具有积极对照组的研究,讨论在更为严格的实验条件下,象棋训练是否具有远迁移效应[16]。遗憾的是,总共涉及近 300 人的两个实验均没有出现任何理想的阳性结果。

总之,目前大多数证据支持可能只是更聪明的孩子更可能在音乐或者象棋领域取得成就。当然,这也便不禁让我们思考一个问题:远迁移的产生是否与个体原本智力水平有关,即聪明的个体更容易从训练中获益?

2.4. 认知训练远迁移中的理论之争

已有研究提出了多种解释以理解认知训练远迁移的产生机制。首先是神经可塑性的解释[19],认为认知训练造成了大脑皮层的可塑性变化。照此理论,发生可塑性变化的皮层将会影响依赖于该皮层的所有心理功能,但迁移效应非常有限的结果对此提出了质疑。其次是加工-特异迁移解释[20],认为认知训练并不能以无差别的方式提升神经系统的功能,而只能增强受到训练的特定加工,当训练任务与目标任务都需要同样的加工时才会有迁移发生,并且任务间共享特征越高迁移效果越好。加工-特异迁移解释的问题在于,不能明确任意两个任务间有哪些足以产生迁移的共享特征,所以不能在训练前做出具体的假设,而只能作为对结果的事后解释。可见,相关理论面临的挑战不仅是解释已经发生的迁移效应,还要能够预测在什么情况下迁移效应可以发生、在什么情况下不能发生。

复杂认知技能获得观点[21]的提出为解决这一困境带来了希望,该观点认为认知训练会使个体形成某种复杂的认知技能,并且这种复杂技能经过训练之后会获得自动化,当这些认知技能可以应用到有相似需要但未受到训练的任务上时迁移就会发生。不过,这一解释没有对复杂认知技能给出清楚的界定。最近,有研究者提出了认知路线解释[22],认知路线指协调不同认知加工序列的结构,这种结构是完成任务所必需的,训练会使个体发展出新的认知路线,当这一认知路线能够应用于有共同结构的其它任务时就会产生迁移。

值得注意的是,不仅认知训练远迁移一般性理论存在争议,工作记忆训练具体又是如何带动流体智力提升的也存在多种观点。目前有不一定是相互排斥的三种机制,已经被假设用来解释为什么工作记忆训练可能会带来远迁移。首先,工作记忆和流体智力可能共享一个共同的容量约束[23],即流体智力任务上的性能受到工作记忆可以处理的信息量的限制。如果工作记忆能力得到了增强,那么人们的流动智力就有望得到提高[24]。第二种解释侧重于注意过程在工作记忆和流体智力任务中所起的作用[25]。认知要求高的活动,如工作记忆训练,可能促进人们的注意控制,而注意控制又可预测着个体认知技能和学术成就[26]。进一步,最近已经有学者提出注意在流体智力中扮演着核心角色[27]。这样提示未来可以通过训练个体的注意能力,检验流体智力是否会得到提升。

3. 无创脑刺激:揭示认知增强机制的利器

无创脑刺激技术主要包括经颅电刺激和经颅磁刺激两种主要形式,能够直接兴奋或抑制特定脑区,观察对行为的影响从而在脑功能与行为之间建立因果性联系。在过去 20 年中,相关研究络绎不绝,不仅

丰富了我们对话体智力本质特别是神经基础的认识，同时也向我们揭示着认知增强现象的背后机制。

有研究者运用 θ 的经颅交流电(tACS)分别刺激被试左侧前额叶与顶叶[28]，结果发现被试流体智力均得到显著提升，而且刺激左侧顶叶所带来的提升效果更好。在此基础上，后续研究结合 fMRI 技术更有针对性地探讨了为何左侧顶叶 θ tACS 刺激能导致流体智力提升[29]。结果显示，在执行任务时，个体刺激脑区的激活程度显著下降。除此之外，研究者利用高频 γ (40 Hz) tACS 刺激被试左侧前额叶也发现了类似结果[30]。这些结果支持了顶额一体化(P-FIT)智力模型。这种智力的神经生物学模型强调了额叶和顶叶区域以及将这些区域结合成一个同步系统的白质联合束的重要性[31]。而 Neubauer 等人(2017)的结果同时也支持了神经效率假说。该假设认为，与低智商的人相比，高智商的人更有效地利用大脑资源[32]或者具有更快的神经传输时间[33]。

令人惊讶的是，有研究发现无论是双侧或者是单侧前额叶，个体在接受经颅直流电刺激(tDCS)阳极刺激之后，智力表现竟然出现了显著下降[34]。事实上，近 5 年的主要趋势是 tDCS 结合认知训练，进而探讨 tDCS 对认知增强的影响，而非 tDCS 能否带来认知增强。例如发现[35] [36]，当工作记忆训练或执行功能训练结合 tDCS 阳极刺激之后，能产生显著的远迁移效应。总的来说，流体智力仿佛对 tACS 表现出更强的亲和性。鉴于 tACS 与 tDCS 调节机制不同，tACS 偏向神经振荡而 tDCS 仅调节单个神经元的活动，同时神经振荡又与脑内信息传递有关，这暗示流体智力的神经基础可能涉及多脑区联合。

值得注意的是，近年来已经有研究者提出脑区之间不同功能连接也可能影响流体智力[37]。例如有研究选取适当时间间隔(10 ms)，对被试额叶和顶叶进行具有先后性的 rTMS 刺激[38]。结果发现，先刺激顶叶皮层再刺激额叶皮层，被试仅在额叶所负责的逻辑型流体智力上表现进步；先刺激额叶皮层再刺激顶叶皮层，被试仅在顶叶所负责的关系型流体智力上表现进步；同时刺激或者单一刺激均无改善效应。这便提出了一种网络定向的皮质 - 皮质联合(Network-Targeted Cortico-cortical Associative)脑刺激使得认知增强的模式，反映两个目标脑区之一的局部活动会产生调节，主要受益为两个受刺激区域的接收端(*i.e.* A \rightarrow B, effect on B; B \rightarrow A, effect on A) [39]。

4. 神经反馈：认知增强的全新视角

认知训练与无创脑刺激技术其实都可视为第三方干预对于认知能力的影响，而神经反馈训练则更注重个体自我对特定脑区进行调节[40]。因此，流体智力提升的神经反馈训练，可为理解认知增强的神经机制提供新的视角，有助于我们全面认识流体智力本质。

研究者利用 γ 神经反馈成功改变了个体 γ 频带的功率。此外，频带能量的增加与绑定成本的降低和流体智力的提高有关[41]。这提示流体智力可能与特征绑定存在共享的神经机制。在另一项研究中，20 名老年人在 21 天内接受了 8 次 30 分钟的 γ 神经反馈或 β 神经反馈。最终在智力水平上，两组交互作用边缘性显著($P = 0.07$)， β 反馈组有明显上升趋势($P = 0.1$)，而 γ 组前测后测水平相近($P = 0.4$) [42]。再次支持流体智力具有自我可塑性。结果虽暂未统一，除了被试特征不一致外，还可能因为特定频率的神经反馈训练对深层脑电的影响可能是相当不特定的[43]。另外，Gağol 等人(2018)发现高流体智力被试有着较强的 δ 和 γ 相位振幅耦合强度(Phase-Amplitude Coupling, PAC)。这提示不同频带的同步活动可能是流体智力的潜在神经机制，因此单独以特定频带进行神经反馈效果便可能无法获得理想效果。

5. 未来展望

我们必须认识到，目前认知训练所采用的各种内容，都涉及相当复杂的认知加工，这种情况下，无论显著的结果还是不显著的结果都不容易得到清楚的解释。正如 Melby-Lervåg (2016)所认为的，如果认

知训练领域要向前发展,就需要开发和测试新的训练方法,这种方法很可能是基于更深层次的理论分析。通过对已有理论的深入分析,我们得到以下启发:任务的完成往往涉及多个加工过程,这些加工之间的协调(coordination)对于任务完成非常关键;训练能够提升协调的效率,这可能是迁移发生的基础。在已有研究的基础上,本团队提出“加工协调结构同型”的假设:当训练任务和目标任务在加工协调上具有同型结构时,从训练获益到目标任务的迁移将会出现。我们进一步提出原型任务的概念,原型任务较之目标任务更简洁,但涉及相同的信息加工协调结构。因此,可以参照目标任务来选择或设计原型任务,自然就能预测认知训练是否会有迁移效应。

我们也注意到,无创脑刺激和神经反馈研究所涉及到的样本量过小,个体差异容易对结果产生影响。例如有研究便揭示个体颞顶联合处(TPJ)的偏侧化程度可以预测接受 tDCS 刺激后的认知增强效果[44]。有意思的,尽管大量研究逐步趋于认同左侧 PFC 是流体智力的神经基础,但是最近研究却发现个体瑞典文测验得分与右侧 PFC 皮质厚度显著相关,与左侧无关[45]。类似的,流体智力提升效果是否又会受到个体 PFC 偏侧化程度的影响呢?而目前整个认知增强领域都处于激烈的争议之中,究竟是采用方法本身无效,还是有些研究者疏忽的个体差异足够掩盖或者夸大结果?例如期望效应便可能带来认知增强的假阳性[46]。未来研究应立足于大样本,并且尽可能采用多种互补手段和多样的分析技术(例如多体素模式分析、单试次分析方法、时变功能连接和微状态分析等)逐步完善认知增强理论,最终获得稳定的认知增强方法。在流体智力增强的效应与机制研究基础之上,未来更应该开展面向儿童青少年开发教育认知工具研究,力求形成“效应-机制-应用-效应”研究闭环,考察认知增强所带来的实际效益。

基金项目

本文受重庆市研究生科研创新项目资助(CYS20094)。

参考文献

- [1] McGrew, K.S. (2009) CHC Theory and the Human Cognitive Abilities Project: Standing on the Shoulders of the Giants of Psychometric Intelligence Research. *Intelligence*, **37**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2008.08.004>
- [2] Gałol, A., Magnuski, M., Kroczek, B., et al. (2018) Delta-Gamma Coupling as a Potential Neurophysiological Mechanism of Fluid Intelligence. *Intelligence*, **66**, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.11.003>
- [3] Deary, I.J., Strand, S., Smith, P., et al. (2007) Intelligence and Educational Achievement. *Intelligence*, **35**, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.02.001>
- [4] Schmidt, F.L. and Hunter, J. (2004) General Mental Ability in the World of Work: Occupational Attainment and Job Performance. *Journal of Personality and Social Psychology*, **86**, 162-173. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.86.1.162>
- [5] Lynn, R. and Yadav, P.J.I. (2015) Differences in Cognitive Ability, per Capita Income, Infant Mortality, Fertility and Latitude across the States of India. *Intelligence*, **49**, 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.01.009>
- [6] Batty, G.D., Deary, I.J. and Gottfredson, L.S. (2007) Premorbid (Early Life) IQ and Later Mortality Risk: Systematic Review. *Annals of Epidemiology*, **17**, 278-288. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2006.07.010>
- [7] Sala, G. and Gobet, F. (2019) Cognitive Training Does Not Enhance General Cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, **23**, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.10.004>
- [8] Au, J., Sheehan, E., Tsai, N., et al. (2015) Improving Fluid Intelligence with Training on Working Memory: A Meta-Analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, **22**, 366-377. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0699-x>
- [9] Soveri, A., Antfolk, J., Karlsson, L., et al. (2017) Working Memory Training Revisited: A Multi-Level Meta-Analysis of n-Back Training Studies. *Psychonomic Bulletin & Review*, **24**, 1077-1096. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1217-0>
- [10] Melby-Lervåg, M., Redick, T.S. and Hulme, C. (2016) Working Memory Training Does Not Improve Performance on Measures of Intelligence or Other Measures of “Far Transfer” Evidence from a Meta-Analytic Review. *Perspectives on Psychological Science*, **11**, 512-534. <https://doi.org/10.1177/1745691616635612>
- [11] Sala, G. and Gobet, F. (2017) Working Memory Training in Typically Developing Children: A Meta-Analysis of the Available Evidence. *Developmental Psychology*, **53**, 671-685. <https://doi.org/10.1037/dev0000265>

- [12] Teixeira-Santos, A.C., Moreira, C.S., Magalhaes, R., *et al.* (2019) Reviewing Working Memory Training Gains in Healthy Older Adults: A Meta-Analytic Review of Transfer for Cognitive Outcomes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **103**, 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.05.009>
- [13] Jaeggi, S.M., Buschkuhl, M., Jonides, J., *et al.* (2011) Short- and Long-Term Benefits of Cognitive Training. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**, 10081-10086. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103228108>
- [14] Powers, K.L., Brooks, P.J., Aldrich, N.J., *et al.* (2013) Effects of Video-Game Play on Information Processing: A Meta-Analytic Investigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, **20**, 1055-1079. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0418-z>
- [15] Sala, G., Tatlidil, K.S. and Gobet, F. (2018) Video Game Training Does Not Enhance Cognitive Ability: A Comprehensive Meta-Analytic Investigation. *Psychological Bulletin*, **144**, 111. <https://doi.org/10.1037/bul0000139>
- [16] Sala, G. and Gobet, F. (2017) Does Far Transfer Exist? Negative Evidence from Chess, Music, and Working Memory Training. *Current Directions in Psychological Science*, **26**, 515-520. <https://doi.org/10.1177/0963721417712760>
- [17] Butkovic, A., Ullén, F. and Mosing, M.A. (2015) Personality Related Traits as Predictors of Music Practice: Underlying Environmental and Genetic Influences. *Personality and Individual Differences*, **74**, 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.10.006>
- [18] Sala, G. and Gobet, F. (2017) Does Chess Instruction Improve Mathematical Problem-Solving Ability? Two Experimental Studies with an Active Control Group. *Learning & Behavior*, **45**, 414-421. <https://doi.org/10.3758/s13420-017-0280-3>
- [19] Klingberg, T. (2010) Training and Plasticity of Working Memory. *Trends in Cognitive Sciences*, **14**, 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.002>
- [20] Minear, M., Brasher, F., Guerrero, C.B., *et al.* (2016) A Simultaneous Examination of Two Forms of Working Memory Training: Evidence for Near Transfer Only. *Memory & Cognition*, **44**, 1014-1037. <https://doi.org/10.3758/s13421-016-0616-9>
- [21] Taatgen, N.A. (2013) The Nature and Transfer of Cognitive Skills. *Psychological Review*, **120**, 439-471. <https://doi.org/10.1037/a0033138>
- [22] Gathercole, S.E., Dunning, D.L., Holmes, J., *et al.* (2019) Working Memory Training Involves Learning New Skills. *Journal of Memory and Language*, **105**, 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2018.10.003>
- [23] Halford, G.S., Cowan, N. and Andrews, G. (2007) Separating Cognitive Capacity from Knowledge: A New Hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, **11**, 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.04.001>
- [24] Jaeggi, S.M., Buschkuhl, M., Jonides, J., *et al.* (2008) Improving Fluid Intelligence with Training on Working Memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, 6829-6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- [25] Engle, R.W. (2018) Working Memory and Executive Attention: A Revisit. *Perspectives on Psychological Science*, **13**, 190-193. <https://doi.org/10.1177/1745691617720478>
- [26] Strobach, T. and Karbach, J. (2016) Cognitive Training. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4>
- [27] Rueda, M.R. (2018) Attention in the Heart of Intelligence. *Trends in Neuroscience and Education*, **13**, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2018.11.003>
- [28] Santarnecchi, E., Polizzotto, N.R., Godone, M., *et al.* (2013) Frequency-Dependent Enhancement of Fluid Intelligence Induced by Transcranial Oscillatory Potentials. *Current Biology*, **23**, 1449-1453. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.06.022>
- [29] Neubauer, A.C., Wammerl, M., Benedek, M., *et al.* (2017) The Influence of Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS) on Fluid Intelligence: An fMRI Study. *Personality and Individual Differences*, **118**, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2017.04.016>
- [30] Santarnecchi, E., Muller, T., Rossi, S., *et al.* (2016) Individual Differences and Specificity of Prefrontal Gamma Frequency-tACS on Fluid Intelligence Capabilities. *Cortex*, **75**, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.11.003>
- [31] Jung, R.E. and Haier, R.J. (2007) The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of Intelligence: Converging Neuroimaging Evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, **30**, 135-154. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001185>
- [32] Haier, R.J., Siegel Jr., B.V., Nuechterlein, K.H., *et al.* (1988) Cortical Glucose Metabolic Rate Correlates of Abstract Reasoning and Attention Studied with Positron Emission Tomography. *Intelligence*, **12**, 199-217. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(88\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0160-2896(88)90016-5)
- [33] Stelmack, R.M., Knott, V. and Beauchamp, C.M. (2003) Intelligence and Neural Transmission Time: A Brain Stem Auditory Evoked Potential Analysis. *Personality and Individual Differences*, **34**, 97-107. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00032-6)

-
- [34] Sellers, K.K., Mellin, J.M., Lustenberger, C.M., *et al.* (2015) Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) of Frontal Cortex Decreases Performance on the WAIS-IV Intelligence Test. *Behavioural Brain Research*, **290**, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.04.031>
- [35] Brem, A.-K., Almquist, J.N.-F., Mansfield, K., *et al.* (2018) Modulating Fluid Intelligence Performance through Combined Cognitive Training and Brain Stimulation. *Neuropsychologia*, **118**, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.008>
- [36] Trumbo, M.C., Matzen, L.E., Coffman, B.A., *et al.* (2016) Enhanced Working Memory Performance via Transcranial Direct Current Stimulation: The Possibility of Near and Far Transfer. *Neuropsychologia*, **93**, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.10.011>
- [37] Santarnecchi, E., Emmendorfer, A., Tadayon, S., *et al.* (2017) Network Connectivity Correlates of Variability in Fluid Intelligence Performance. *Intelligence*, **65**, 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.10.002>
- [38] Momi, D., Neri, F., Coiro, G., *et al.* (2020) Cognitive Enhancement via Network-Targeted Cortico-Cortical Associative Brain Stimulation. *Cerebral Cortex*, **30**, 1516-1527. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz182>
- [39] Casula, E.P., Pellicciari, M.C., Ponzio, V., *et al.* (2016) Cerebellar Theta Burst Stimulation Modulates the Neural Activity of Interconnected Parietal and Motor Areas. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 36191. <https://doi.org/10.1038/srep36191>
- [40] Scharnowski, F. and Weiskopf, N. (2015) Cognitive Enhancement through Real-Time fMRI Neurofeedback. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, **4**, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.05.001>
- [41] Keizer, A.W., Verschoor, M., Verment, R.S., *et al.* (2010) The Effect of Gamma Enhancing Neurofeedback on the Control of Feature Bindings and Intelligence Measures. *International Journal of Psychophysiology*, **75**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.10.011>
- [42] Staufenbiel, S.M., Brouwer, A.M., Keizer, A.W., *et al.* (2014) Effect of Beta and Gamma Neurofeedback on Memory and Intelligence in the Elderly. *Biological Psychology*, **95**, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.05.020>
- [43] Fernández, T., Harmony, T., Fernández-Bouzas, A., *et al.* (2007) Changes in EEG Current Sources Induced by Neurofeedback in Learning Disabled Children. An Exploratory Study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **32**, 169-183. <https://doi.org/10.1007/s10484-007-9044-8>
- [44] Yang, L.Z., Zhang, W., Wang, W., *et al.* (2020) Neural and Psychological Predictors of Cognitive Enhancement and Impairment from Neurostimulation. *Advanced Science (Weinh)*, **7**, Article ID: 1902863. <https://doi.org/10.1002/advs.201902863>
- [45] Filmer, H.L., Ehrhardt, S.E., Bollmann, S., *et al.* (2019) Accounting for Individual Differences in the Response to tDCS with Baseline Levels of Neurochemical Excitability. *Cortex*, **115**, 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.02.012>
- [46] Dougherty, M.R., Hamovitz, T. and Tidwell, J.W. (2016) Reevaluating the Effectiveness of n-Back Training on Transfer through the Bayesian Lens: Support for the Null. *Psychonomic Bulletin & Review*, **23**, 306-316. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0865-9>