

N-Back训练任务及其对行为和大脑的影响

肖越扬

西南大学心理学部, 重庆

收稿日期: 2023年2月15日; 录用日期: 2023年4月1日; 发布日期: 2023年4月12日

摘要

工作记忆是指在以目标为导向的活动中所涉及的一个多方面的、有限资源的认知系统, 现有研究已经验证了通过训练可以增强工作记忆背后的神经网络, 提高神经活动效率, 从而可能产生对各种认知和功能领域的改善。本文首先介绍了当前工作记忆训练领域应用较多的n-back训练范式, 从流体智力、注意和执行功能三个方面梳理了n-back训练对行为的影响, 从神经结构和神经元活动两方面归纳了n-back训练对大脑的影响, 并总结了训练的中长期持续效果, 最后对未来的改进方向进行有益展望。

关键词

N-Back, 训练, 流体智力, 迁移, 神经影像

The N-Back Training Task and Its Effects on Behavior and the Brain

Yueyang Xiao

Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing

Received: Feb. 15th, 2023; accepted: Apr. 1st, 2023; published: Apr. 12th, 2023

Abstract

Working memory refers to a multifaceted, limited-resource cognitive system involved in goal-oriented activities. Existing studies have verified that n-back training can enhance the neural network behind working memory and improve the efficiency of neural activities, which could result in improvements in various cognitive functions. This review first introduces the widely-used n-back training paradigm, sorts out the influence of n-back training on behavior from three aspects of fluid intelligence, attention and executive function, summarizes the influence of n-back training on brain from two aspects of brain structure and neural activity, and summarizes the medium and long-term sustained effects of training. Finally, the future improvement direction is prospected.

Keywords

N-Back, Training, Fluid Intelligence, Transfer, Neuroimaging

Copyright © 2023 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

工作记忆(working memory, WM)是指在以目标为导向的活动中所涉及的一个多方面的、有限资源的认知系统，与人对新颖信息的推理能力和对目标相关信息的直接注意能力密切相关。越来越多的研究已经验证了定向训练可以增强 WM 背后的神经网络，提高神经活动效率，从而可能产生对各种认知和功能领域的改善。通过对 23 名健康老年人为期五周的 WM 训练，研究者观察到训练组出现了在注意和情景记忆领域任务表现的提高，同时神经影像学结果发现与训练相关的神经元效率的提高[1]。但是这里使用的训练任务包括 4 个视觉空间 WM 任务和 3 个言语 WM 任务，如果可以通过较少类型的训练任务实现较高的训练效果，将更有实际操作价值和应用意义。

N-back 范式常见于 WM 训练研究[2] [3]。在 n-back 任务中，必须确定当前呈现的物品与之前 n 次呈现的刺激是否相同或不同，任务的难度和对 WM 的要求随着 n 的增加而增加(例如, 1-, 2-, 3-back)。N-back 任务作为认知训练相对于其他使用多种复合认知任务的训练具有更易操作性，对研究者和受训人群来讲对时间和精力的消耗都更小。并且，n-back 作为 WM 任务即需要对 WM 内容的快速刷新和保持，还要求被试根据不同的任务规则对先前的信息进行识别和操作、对与当前任务暂时无关的信息进行暂时抑制以供后续调用。

近年来众多研究者对 n-back 训练进行了详尽的研究，诸如不同 n-back 变式对训练效果的影响、在不同认知功能领域的训练效果、跨任务范式的迁移以及采用神经影像学技术对神经结构与大脑活动的变化进行了探讨[4]-[10]。接下来本文将对近年间研究中使用的 n-back 训练任务与训练效果(认知行为迁移与神经层面变化)进行梳理与讨论，并对未来的改进方向进行展望。

2. N-Back 训练范式

在经典的 n-back 任务中，给被试呈现一系列刺激，被试需要决定每个刺激是否与之前第 n 个试次中呈现的刺激相同，与当前试次呈现的刺激相同的 n 个之前的刺激称为目标(target)，一系列刺激中与当前刺激匹配的其他位置的刺激称为分心物(lure 或 distractor) [11]。大多数研究并未对刺激系列中分心物与目标进行探讨，仅有部分研究研究 n-back 训练中 lure 比例对训练效果(主要是抑制控制)的效果[12]。

n-back 作为训练任务有单一(single) n-back、双(dual) n-back 以及三(triple) n-back，作为认知训练任务在研究中最为常见的是前两种。在单一 n-back 任务中，被试只需要注意一个单一类别的刺激流，比如数字、字母 n-back 以及空间位置(visuospatial) n-back，而在双 n-back 任务中，给被试同时呈现两个来自不同感觉通道的刺激流，其中最常见的是给被试呈现视觉刺激的同时呈现听觉刺激[2]。

为了能够最大限度地且对每一个被试有针对性地进行训练，认知训练多采用适应性(adaptive)规则来根据每个被试的表现水平来自动地调整任务难度以始终保持一定的挑战性，其中适用范围最广的还是使用的根据错误试次个数进行任务难度调整的规则[2]。接下来就对近几年 n-back 训练研究中经常出现的不

同的任务设计(如刺激类型和适应性规则)进行详细介绍。

在众多 n-back 训练任务中使用最多的是双 n-back 任务设计[2] [12]。在这个任务中, 以每 3 s 一个刺激的速度给被试同时呈现听觉刺激和视觉刺激, 听觉刺激是由单个辅音字母(一共八个)组成, 视觉刺激是由屏幕中由正方形代表的独立的空间位置(一共八种)组成, 要求被试同时判断两个刺激流中当前呈现的刺激是否与该刺激流中第 n 个前出现的刺激一致: 只对一致试次进行按键反应, 两只手分别对两个刺激流中的一致试次进行按键反应。每个训练阶段(session)大约 25 分钟, 由 20 个组块(block)组成, 每个 block 有 $20 + n$ 个试次。每个 block 中具体的 n 值(即任务难度水平)由每个被试的表现而决定: 如果表现提高(错误少于 3 个试次), 则下一个 block 中 n 值加一; 如果表现下降(错误多于 5 个试次), 则下一个 block 中 n 值减一; 其他情况下 n 值保持不变。这种形式的训练涉及对两个同时出现的任务的管理, 包括对每一个任务的执行过程, 并且由于任务包含两种不同的刺激以及 n 值是不断变化的, 它可以抑制任务特定(task-specific)的策略的发展和自动化过程的参与。许多关于 n-back 训练对各种认知功能的影响的研究都采用了这一训练范式[13] [14]。

除了与 Jaeggi 等人[2]使用完全一样的任务设计, 还有一些研究在其基础上进行了适应性规则的调整, 比如 Salminen 等人[7]使用的刺激材料与 Jaeggi [2]团队的一致, 但是从 2-back 开始, 每个 block 中被试须在两个刺激流下都达到 90% 的正确率才能进入下一个难度水平, 如果正确率低于 70%, 训练难度将降低一个水平(最低难度为 1-back), 其他任务表现结果下训练难度都将保持不变。Studer-Luethi 和 Meier [15]则对刺激材料与适应性规则都进行了不同程度的修改, 这里一个 session 约 20 分钟共有 15 个 block, 同样每个 block 有 $20 + n$ 个试次, 所使用的听觉刺激也与原训练任务无异, 但是视觉刺激使用了动画形态的动物图案(比如兔子和鼹鼠, 会出现在视野中 9 个可能的空间位置), 每完成一个试次反馈会立即出现在屏幕上方。对于每一个 n 水平, 都有 4、8、11 个三种预定网格大小的视野尺寸(filed size)。如果被试出现错误次数小于 3, 视野大小依序增大, 当成功完成三个 block 后, n 水平增加; 如果错误次数大于 5, 视野尺寸依序减小, 三个 block 失败后 n 水平降低。

有些对比不同任务设计对训练效果影响的研究还会采用单一 n-back 任务作为对照组或积极控制组, 如前所述, 单一 n-back 任务只给被试呈现一个刺激流(比如数字 n-back [16])。不同研究中使用的单一 n-back 任务的差异主要在于使用的刺激材料, 比如 Salminen 等人[7]的两个对照组分别使用单一的言语(听觉) n-back 任务和视觉 n-back 任务, 但是即便是同一类型的刺激, 也会出现不同刺激材料或刺激内容上的差异。同是使用视觉刺激的训练, Pergher 等人[17]使用的刺激材料是有意义的物体图片(比如苹果和桌子), Necka 等人[18]使用的是 17 种几何图形。同样是具有语义的言语刺激, 有的研究使用简单的辅音字母[19], 还有研究者使用更为复杂一些的同音异形单词(如 “ate-eight” “blue-blew” “feel-fill”) [16]。根据想要考察的认知功能领域的差异, 部分使用单一 n-back 任务的研究会对实验刺激中 lure 和 target 的比例进行调整[18] [20]。除了呈现刺激流数量的差异, 单一 n-back 训练与双 n-back 训练的适应性规则也有一定的差异, 除了简单的统计错误试次个数[19]或每个 block 的正确率[20], 单一 n-back 会对每个 block 中的命中率、误报率或正确拒绝等指标进行计算, 以此为依据进行任务难度的调整[16] [18]。

除此之外, 还有一些研究会控制刺激间时间间隔(ISI)来调整任务难度, 比如 Doumas 等人(2009)只使用 2-back 和 3-back 两种负荷条件, 通过设置 2500 ms、2200 ms、1800 ms、1500 ms、1200 ms 以及 1100 ms 六种 ISI 条件以代表 6 种难度水平, Heinzel 等人[16]在这种设计的基础上增加了负荷条件, 实现了 7 个不同的难度水平: 水平 1-3 使用 0-、1-、2-back 三种负荷条件, ISI 随着难度水平增减以 500 ms 的间隔从 1500 ms 递减到 500 ms; 水平 4-6 使用 1-、2-、3-back 三种负荷条件, ISI 依旧从水平 4 开始从 1500 ms 依次递减; 水平 7 中使用 2-、3-、4-back 三种负荷水平, ISI 为 1500 ms。

3. N-Back 训练对行为的影响

作为认知训练，研究者们最关心的是其在未训练的任务上产生的正向迁移(transfer)效应，即相对于训练前的任务表现，被试在训练后表现出的任务表现的提高。迁移可分为近迁移和远迁移，这里将利用与训练任务具有相同任务结构、只是实验材料和内容有所变动的实验任务上出现的迁移称为近迁移，将与训练任务具有不同结构的实验任务中出现的迁移称为远迁移。

在众多认知领域中，流体智力的迁移是在 n-back 训练相关文献中出现最多的，大多数研究使用训练前后矩阵推理任务(如瑞文推理测验[17])分数差异描述训练对流体智力的影响[6]，或者同时使用瑞文推理测验与难度较大的 Bochumer Matrizen-Test (BOMAT) [2]，此外还有德国研究者使用德国智力测验 (leistungspruefsystem, LPS) 的图形关系子测验(figural relations subset) [16]。Pergher 等人[17]发现在老年人和年轻人群体中均出现了流体智力的迁移，元分析结果也支持这一结果，使用单一 n-back 与使用双 n-back 训练任务没有显著差异，迁移效果也不局限于使用矩阵推理任务得到的结果[21]，矩阵推理任务与其他流体智力测量方式的迁移效果相当。但是 Soveri 等人[22]发现 n-back 训练在流体智力领域的迁移效果远小于在未训练过的 n-back 任务中的效果，实际应用价值很小。

基于 WM 与注意的复杂关系，n-back 训练对注意的影响也受到了广泛的探讨，注意网络任务(attention network task, ANT)和 TOVA 测验(test of variables of attention)常用于考察注意领域的迁移效果，但是有研究显示只有老年人群体中均出现了注意领域的迁移[17]，使用注意瞬脱(attention blink)任务在老年人和青年人群体中也均没有发现迁移效果。

执行功能主要有 WM 刷新、任务转换以及抑制控制三个核心成分，n-back 任务主要涉及被试刷新能力和抑制能力的调用，双 n-back 中因有两种不同通道的信息流，也涉及到对双任务执行和任务转换能力的训练。基于这一特点，研究者们还关注了执行功能、加工速度、干扰抑制、注意容量以及刷新功能等认知功能的训练后变化。确实研究者发现经过 4 周的适应性 n-back 训练后，老年被试的行为表现除了迁移到之前提到的流体智力任务，还出现在执行功能和加工速度(e.g., stroop, verbal fluency 和 digit symbol substitution [16])相关的任务中，此外，情景记忆任务中也出现了训练效果的迁移[15]。

尽管存在以上述为代表的众多报告有益结果的研究，仍有可观数量的研究并没有发现 n-back 训练带来可观的迁移效果，比如对 27 名健康成年人进行了为期 5 周共 12 个 session 的双 n-back 训练，但是训练前后并未观察到 WM、加工速度或流体智力任一领域能力的提高，Thompson 等人[23]也未发现训练后 WM 或流体智力任务表现的提高。对被试进行了总时长达 8h 的双 n-back 训练后观察到的刷新任务表现的提高，但是因使用的双通道 WM 刷新任务与训练任务高度相似[9]，研究者将其解释为一中任务特异或过程特异的策略获得；无独有偶，Holmes 等人[19]针对“工作记忆训练任务是否是范式特异性的？”进行了研究，结果也没有发现跨实验范式的进步。这些研究都对 n-back 的训练效果提出了挑战，需要稳定可靠的训练结果和迁移效果才能让研究者们认可其作为认知训练的应用价值和实际意义。

4. N-Back 训练对大脑的影响

尽管在认知功能领域的训练效果参差不齐，研究者通过神经影像学方法还是观察到了神经层面上的有益训练效果。Brehmer 等人[1]采用多个训练任务对老年人进行训练，除了行为表现有所提高，还发现新皮层活动的减少和皮层下活动的增加，这种变化被解释为神经效率的提高，这一解释也得到了一些老年人和青年人任务态功能核磁共振研究的支持。因此，一个有效的认知训练除了具有行为表现上的变化，还应该伴随有神经结构和神经元活动的变化。

神经结构方面，Küper 和 Karbach [24]对被试进行了总时长为 480 min 的双 n-back 训练，DTI 结果显

示训练组出现了白质通道上的显著变化，连接大脑不同区域的白质通道的整体性增加，与控制组相比，训练组在胼胝体前部的变化尤为显著；灰质方面，训练组被试右上顶叶灰质容量显著增加，且增加程度与训练带来的行为表现的进步程度有关，而右侧核状体的容量有短暂的减小[4]。

神经元活动方面，200 min 的双 n-back 训练对被试 WM 相关脑区(主要是额顶区域)产生了影响，尤其是额上皮层、额中皮层、顶下皮层、前扣带皮层以及颞中皮层等脑区激活程度显著降低[6]；行为任务表现的提高双侧顶叶区域(主要是左侧顶上小叶(left superior parietal lobule)和右侧上缘回后侧(right supramarginal gyrus posterior))激活的增加相关，具体表现为正确率的提高伴随着被试顶叶区域激活增加[18]。

训练后训练任务和迁移任务都出现了纹状体激活的增强，且纹状体激活程度增加与行为提高有关系[9]；全脑模块化程度稳定增加，DMN 的自主性以及相关系统之间的整合受到训练的调节，训练中任务自动化(automaticity)产生额顶和 DMN 之间整合、皮层下系统整合的非线性变化[5]。这种变化在静息态脑网络中也有所体现，Salminen 等人[8]发现总计 480 min 的双 n-back 训练对默认模式网络活动造成了影响，任务表现的提高伴随着腹侧 DMN 在右侧额下回(rIPG)功能连接的增强以及左侧顶上皮层(lSPC)功能连接的减弱，其中功能连接的增强与 WM 能力的提高相关。

5. N-Back 训练的持续效果

认知训练需要研究者和被试都投入客观的时间和精力，即便是 n-back 训练可以由受训者自行在家使用程序包完成训练，也需要长久的坚持。因此如果产生的训练效果只是短暂的昙花一现，就失去了耗费时间和精力的意义。而且相对于日常生活中接收到的海量信息以及对众多认知功能的调用，一周甚至一个月的认知训练对认知功能和大脑活动造成的影响十分微弱，并且长期追踪调查需要极大的人力和财力，这两点都对考察认知训练的持续效果造成较大阻碍，极少的研究报告了训练后的随访效果。尽管如此，少量报告训练效果稳定持久性的研究认为诸如 n-back、眼跳等认知训练具有实用意义。

Miro-Padilla 等人[6]对被试进行了 4 次为期一周共计 200 min 的双 n-back 训练，通过 fMRI 发现额上皮层、额中皮层、顶下皮层、前扣带皮层以及颞中皮层等与 WM 相关的脑区激活程度减小，并且这种激活程度的降低在五周之后依旧保持稳定。除此之外，训练组右侧顶上皮层的灰质容量出现持续不变的增加[4]。这一发现支持了双 n-back 任务作为认知训练对提高神经效率的有效性，而且这种神经层面的变化在训练结束数周后依旧保持稳定。行为表现和神经层面的稳定变化支持了 n-back 训练效果的持久性，使之作为认知训练仍具有进一步探讨、研究以及改进的空间和可能。

6. N-Back 训练的前景展望

n-back 等认知训练的意义主要在于通过一种或有限数量的任务实现多领域多方面的提高效果，鉴于其训练效果的争议性，除了应在行为和神经机制的角度进行更具实质性的探索，日后的研究还应该 1) 对训练效果进行长期随访和后续分析，以得出关于所观察到的训练和迁移效应的稳定性与持久性的结论；2) 频繁观察到训练效果的领域应考虑使用难度更高的任务类型[25]，没有观察到或争议较大的迁移领域可以考虑使用多样的测量手法，结合所使用的 n-back 变式的特异性，当然同时需要避免任务特异性的迁移，在更深层的认知执行机制的角度对训练任务加以改进；3) 基于神经影像学的证据，未来对训练效果的探讨可以更多从神经指标的角度入手[12]，寻找更稳健、更具实质性的效果。

Pergher 等人[17]的研究中只有老年人在流体智力中出现了训练效果的迁移，而年轻人中却没有出现，还有研究报告了训练干预对特殊人群(如 ADHD 和精神分裂症)有显著效果，这些提示研究者可能具有某些特定特点的人群更容易在训练中获益，或者说这类人具有更强的神经可塑性。Salminen 等人[9]发现，

经过训练的老年人在训练任务和使用与训练任务类似刺激的近迁移任务中的表现都与未经过训练的年轻人相当。这暗示我们对于一些认知退化的老年人或部分特殊群体，在经过训练后，在某些领域存在恢复正常或近似正常的可能。未来研究者可以从“具有获得最大训练效果的人群特点”的角度对认知训练进行深入探讨，根据行为或神经学指标识别最具受益潜能的群体，有针对性地进行指导与治疗。

参考文献

- [1] Brehmer, Y., Rieckmann, A., Bellander, M., Westerberg, H., Fischer, H. and Bäckman, L. (2011) Neural Correlates of Training-Related Working-Memory Gains in Old Age. *Neuroimage*, **58**, 1110-1120. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.06.079>
- [2] Jaeggi, S.M., Buschkuhl, M., Jonides, J. and Perrig, W.J. (2008) Improving Fluid Intelligence with Training on Working Memory. *PNAS*, **105**, 6829-6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- [3] Jaeggi, S.M., Studer-Luethi, B., Buschkuhl, M., Su, Y.-F., Jonides, J. and Perrig, W.J. (2010) The Relationship between N-Back Performance and Matrix Reasoning—Implications for Training and Transfer. *Intelligence*, **38**, 625-635. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2010.09.001>
- [4] Miró-Padilla, A., Bueichekú, E., Adrián-Ventura, J., Costumero, V., Palomar-García, M.-Á., Villar-Rodríguez, E., Marin-Marin, L., Aguirre, N. and Ávila, C. (2021) Sustained and Transient Gray Matter Volume Changes after N-Back Training: A VBM Study. *Neurobiology of Learning and Memory*, **178**, Article ID: 107368. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2020.107368>
- [5] Miró-Padilla, A., Bueichekú, E. and Ávila, C. (2020) Locating Neural Transfer Effects of N-Back Training on the Central Executive: A Longitudinal fMRI Study. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 5226. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62067-y>
- [6] Miró-Padilla, A., Bueichekú, E., Ventura-Campos, N., Flores-Compañ, M.J., Parcet, M.A. and Ávila, C. (2019) Long-Term Brain Effects of N-Back Training: An fMRI Study. *Brain Imaging and Behavior*, **13**, 1115-1127. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9925-x>
- [7] Salminen, T., Forlim, C.G., Schubert, T. and Kuhn, S. (2020) Dual N-Back Training Improves Functional Connectivity of the Right Inferior Frontal Gyrus at Rest. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 20379. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77310-9>
- [8] Salminen, T., Frensch, P., Strobach, T. and Schubert, T. (2016) Age-Specific Differences of Dual N-Back Training. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, **23**, 18-39. <https://doi.org/10.1080/13825585.2015.1031723>
- [9] Salminen, T., Kuhn, S., Frensch, P.A. and Schubert, T. (2016) Transfer after Dual N-Back Training Depends on Striatal Activation Change. *Journal of Neuroscience*, **36**, 10198-10213. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2305-15.2016>
- [10] Salminen, T., Mårtensson, J., Schubert, T. and Kühn, S. (2016) Increased Integrity of White Matter Pathways after Dual N-Back Training. *Neuroimage*, **133**, 244-250. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.028>
- [11] Kirchner, W.K. (1958) Age Differences in Short-Term Retention of Rapidly Changing Information. *Journal of Experimental Psychology*, **55**, 352-358. <https://doi.org/10.1037/h0043688>
- [12] Oelhafen, S., Nikolaidis, A., Padovani, T., Blaser, D., Koenig, T. and Perrig, W.J. (2013) Increased Parietal Activity after Training of Interference Control. *Neuropsychologia*, **51**, 2781-2790. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.08.012>
- [13] Li, W., Zhang, Q., Qiao, H., Jin, D., Ngetich, R.K., Zhang, J., Jin, Z.L. and Li, L. (2021) Dual N-Back Working Memory Training Evinces Superior Transfer Effects Compared to the Method of loci. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 3072. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82663-w>
- [14] Lilenthal, L., Tamez, E., Shelton, J.T., Myerson, J. and Hale, S. (2013) Dual n-back Training Increases the Capacity of the Focus of Attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, **20**, 135-141. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0335-6>
- [15] Studer-Luethi, B. and Meier, B. (2020) Is Training with the N-Back Task More Effective Than with Other Tasks? N-Back vs. Dichotic Listening vs. Simple Listening. *Journal of Cognitive Enhancement*, **5**, 434-448. <https://doi.org/10.1007/s41465-020-00202-3>
- [16] Heinzel, S., Lorenz, R.C., Pelz, P., Heinz, A., Walter, H., Kathmann, N., Rapp, M.A. and Stelzel, C. (2016) Neural Correlates of Training and Transfer Effects in Working Memory in Older Adults. *Neuroimage*, **134**, 236-249. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.068>
- [17] Pergher, V., Wittevrongel, B., Tournoy, J., Schoenmakers, B. and Van Hulle, M.M. (2018) N-Back Training and Transfer Effects Revealed by Behavioral Responses and EEG. *Brain and Behavior*, **8**, e01136. <https://doi.org/10.1002/brb3.1136>

-
- [18] Nęcka, E., Gruszka, A., Hampshire, A., Sarzyńska-Wawer, J., Anicai, A.-E., Orzechowski, J., *et al.* (2021) The Effects of Working Memory Training on Brain Activity. *Brain Science*, **11**. <https://doi.org/10.3390/brainsci11020155>
 - [19] Holmes, J., Woolgar, F., Hampshire, A. and Gathercole, S.E. (2019) Are Working Memory Training Effects Paradigm-Specific? *Frontiers in Psychology*, **10**, Article 1103. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01103>
 - [20] Chooi, W.T. and Logie, R. (2020) Changes in Error Patterns during N-Back Training Indicate Reliance on Subvocal Rehearsal. *Memory & Cognition*, **48**, 1484-1503. <https://doi.org/10.3758/s13421-020-01066-w>
 - [21] Au, J., Sheehan, E., Tsai, N., Duncan, G.J., Buschkuhl, M. and Jaeggi, S.M. (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>
 - [22] Soveri, A., Antfolk, J., Karlsson, L., Salo, B. and Laine, M. (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>
 - [23] Thompson, T.W., Waskom, M.L., Garel, K.L., Cardenas-Iniguez, C., Reynolds, G.O., Winter, R., *et al.* (2013) Failure of Working Memory Training to Enhance Cognition or Intelligence. *PLOS ONE*, **8**, e63614. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063614>
 - [24] Küper, K. and Karbach, J. (2015) Increased Training Complexity Reduces the Effectiveness of Brief Working Memory Training: Evidence from Short-Term Single and Dual N-Back Training Interventions. *Journal of Cognitive Psychology*, **28**, 199-208. <https://doi.org/10.1080/20445911.2015.1118106>
 - [25] Heinzel, S., Schulte, S., Onken, J., Duong, Q.L., Riemer, T.G., Heinz, A., Kathmann, N. and Rapp, M.A. (2014) Working Memory Training Improvements and Gains in Non-Trained Cognitive Tasks in Young and Older Adults. *Ageing, Neuropsychology, and Cognition*, **21**, 146-173. <https://doi.org/10.1080/13825585.2013.790338>