

变得更聪明：经皮迷走神经刺激术增强认知吗？

徐 胜, 刘东奇

武警海警学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2022年12月1日; 录用日期: 2023年1月10日; 发布日期: 2023年1月19日

摘 要

认知增强是指采用任何合法手段使健康个体达到最佳表现。近年来, 经皮迷走神经刺激(transcutaneous vagus nerve stimulation, tVNS)作为一种认知增强技术受到研究者的高度关注。既有研究表明, tVNS对认知的多个方面产生影响, 并有可能在饮食行为和亲社会行为两个领域得到应用。未来可从丰富刺激参数设置、选取恰当测量指标、考量个体差异变量以及联合其他认知增强技术等方面改进研究。

关键词

经皮迷走神经刺激, 经皮耳迷走神经刺激, 经皮颈迷走神经刺激, 认知增强

To Become Smarter: Does Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Enhance Cognition?

Sheng Xu, Dongqi Liu

China Coast Guard Academy, Ningbo Zhejiang

Received: Dec. 1st, 2022; accepted: Jan. 10th, 2023; published: Jan. 19th, 2023

Abstract

Cognitive enhancement refers to the use of any legitimate means to make healthy people reach to one's best. In recent years, researchers highly focus on transcutaneous vagus nerve stimulation (tVNS) as one of the cognitive enhancement technologies. Studies have shown that tVNS has impacts on many aspects of cognition. In addition, tVNS may be applied to adjusting the dietary behavior and prosocial behavior of healthy people. Future research should enrich the stimulus parameters set, select the appropriate measurement index, consider individual differences and combine other cognitive enhancement techniques.

Keywords

Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation, Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation, Transcutaneous Cervical Vagus Nerve Stimulation, Cognitive Enhancement

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

“更快、更高、更强——更团结”——新奥林匹克格言凝聚了人类在追求卓越道路上的美好愿望。为此, 在实现个人和集体目标的过程中, 人们想方设法努力发挥自身的最大潜能。然而, 这样的目标并非总能实现, 因而需要科学的介入以便帮助人们寻找提升自身能力和表现的方法或技术。认知增强(cognitive enhancement)就是这样的研究领域。认知增强是指采用任何合法手段使健康个体达到最佳表现(Colzato, 2018)。在这诸多合法手段中, 非侵入性脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)技术近年来受到研究者的高度关注(游旭群等, 2019), 经皮迷走神经刺激(transcutaneous vagus nerve stimulation, tVNS)是其中一种富有前景的 NIBS 技术(Colzato & Beste, 2020)。

人的第 10 对脑神经为迷走神经, 它不但能够调节诸如咽喉肌肉、内脏平滑肌以及心肌等多种脏器的活动, 还影响着脑自身的功能实现(顾楠楠, 李春波, 2020)。有鉴于此, 迷走神经刺激(vagus nerve stimulation, VNS)作为一种治疗手段已被美国食品药品监督管理局先后批准用于治疗难治性癫痫和抑郁症(Cristancho et al., 2011)。但植入性 VNS 存在有创、风险高且价格昂贵等局限(康君伟等, 2022), 而由植入性 VNS 发展而来的 tVNS 则是一种无创、安全、经济的刺激迷走神经的 NIBS 技术(Badran et al., 2018; Capone et al., 2015; Kreuzer et al., 2012; Redgrave et al., 2018), 它由 Ventureyra (2000)首次提出。tVNS 传输系统依赖于迷走神经传入的皮肤分布, 或在外耳(迷走神经耳支), 或在颈部(迷走神经颈支)。解剖学证据表明, 耳甲区(auricular concha region)是哺乳动物体表唯一有迷走神经分布的区域(Butt et al., 2020)。因而相较于经皮颈迷走神经刺激(transcutaneous cervical vagus nerve stimulation, tcVNS), 研究者多使用经皮耳迷走神经刺激(transcutaneous auricular vagus nerve stimulation, taVNS)。He 等(2013)结合 tVNS 和神经示踪技术, 在健康成年雄性大鼠耳甲区注射荧光示踪剂霍乱毒素 B 亚单位, 他们发现跨突触标记到的神经纤维终止于孤束核(nucleus of tract solitary, NTS)尾部。同样地, tVNS 刺激健康成人左耳或右耳耳甲部产生了 NTS-边缘叶脑网络的调制效应(方继良等, 2014; Frangos et al., 2015)。既有研究表明, tVNS 主要通过去甲肾上腺素(norepinephrine, NE)、 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, γ -GABA)等神经递质对认知进行调控(Colzato & Beste, 2020; van Leusden et al., 2015)。目前 tVNS 对健康人认知影响的相关研究不断涌现, 但仍处于初步发展阶段。为更好地促进未来研究, 本文首先对现有 tVNS 影响健康人认知表现的实证研究进行梳理, 接着说明 tVNS 在健康人饮食行为和亲社会行为两个领域的应用可能性, 最后指出未来可能的研究方向。

2. 经皮迷走神经刺激对认知的影响

2.1. 感知觉

内感受(interoception)是对内部身体状态的感受能力, 它是支持各种高级认知功能的基础感觉。Villani 等(2019)利用心跳计数任务和心跳识别任务来探求 taVNS 对心脏内感受的影响。结果表明, 相较于伪刺

激, taVNS 提高了参与者对心跳识别的准确性但不影响心跳计数; 另外, 虽然参与者在接受真刺激期间对内感受敏感性的判断更有信心, 但 taVNS 并没有调节内感受意识。Richter 等(2020)则采用 tcVNS 进一步表明迷走神经在内感受过程中对神经内脏整合起着直接作用。

2.2. 抑制控制

Beste 等(2016)利用向后抑制范式和心理负荷反应抑制范式探讨了 taVNS 对健康大学生抑制控制不同方面的影响。结果显示, 当且仅当工作记忆加工需要控制反应抑制时, taVNS 才提高反应抑制表现。Fischer 等(2018)还发现, taVNS 促使健康大学生在反应冲突发生后对 Simon 任务中的空间不相容试次有着更快的反应。Keute 等(2020)考察了 taVNS 如何影响健康年轻人反应冲突的行为表现和额中线 θ 波活动。结果表明, 在诱发 go/stop 冲突的试次中, taVNS 相较于伪刺激降低了冲突成本且提高了额中线 θ 波活动。但 taVNS 并非总能减少反应冲突, 如 taVNS 会降低健康参与者在第二阶段 flanker 任务上的反应准确性 (Konjusha et al., 2022)。

日常生活中, 人们在面对多种反应选择时需要对反应进行优先级处理。Steenbergen 等(2015)利用停止 - 改变范式证明, taVNS 可以增强健康大学生动作级联期间反应选择功能且加快在连续执行两个动作时的反应。Jongkees 等(2018)表明, taVNS 相较于伪刺激增强健康大学生在序列反应时任务中的反应选择。

Keute 等(2018)采用阈下反应启动范式联合脑电图(electroencephalogram, EEG)测量以检测 taVNS 对健康年轻人自主运动抑制的行为和电生理表现。其中, 阈下反应启动范式可以测量负相容性效应(negative compatibility effect, NCE), 这是由于自主运动抑制可以引发启动效应的反转; EEG 测量选择单侧化准备电位(lateralized readiness potentials, LRP)作为指标。结果发现, taVNS 增强同侧手 NCE, 显著减少对侧半球 LRP 振幅并伴随其潜伏期的增加。

2.3. 认知灵活性

Keute, Boehrer 等(2019)探讨了 taVNS 对健康年轻人视觉双稳态知觉的影响。视觉双稳态知觉任务包括一个静态任务(纳克立方体)和一个动态任务(运动产生的结构)。遗憾的是, 他们并没有发现 taVNS 可以调节双稳态知觉。Tona 等(2020)采用意外的线索化任务转换范式揭示了不同刺激强度的 taVNS (0.5 mA 和 1.0 mA)不影响健康年轻人的任务转换成绩。然而, 有研究表明, taVNS 可以提高健康参与者在定势转移范式中的认知灵活性, 其表现在转换代价在 taVNS 比在伪刺激期间减小(Borges et al., 2020)。Borges 等(2020)还发现 taVNS 可能对认知灵活性比对抑制控制有着更强的影响。

福流是指人们完全沉浸在一项活动时所体验到一种愉快的心理状态。Colzato, Wolters 和 Peifer (2018)发现 taVNS 降低了健康大学生的福流体验。根据网络重置理论, taVNS 可以增强蓝斑(locus coeruleus, LC)的激活从而促进了整体性的注意重置, 这允许行为快速适应不断变化的环境。

2.4. 学习与记忆

tVNS 对学习及记忆的影响表现在多个方面: 1) 联想学习与记忆。taVNS 可以提高健康老年人的联想记忆表现(Jacobs et al., 2015)。当 taVNS 与易于学习的类别相配对时, taVNS 稳定增强了英语为母语且不熟悉普通话的健康成人的语音类别学习和正确的刺激 - 反应联结的保持(Llanos et al., 2020)。2) 工作记忆。Sun 等(2021)发现离线 taVNS 可以增强健康大学生的空间工作记忆且增强效果特异于空间 3-back 任务。3) 顺序记忆。Kaan 等(2021)对健康年轻人施加 taVNS 和伪刺激发现, taVNS 可以提高语音相似项目上顺序记忆任务的准确性。4) 情绪记忆。虽然 taVNS 并不影响两个年龄群体(18~30 岁和 45~80 岁)有关词汇的即时回忆和延迟再认的准确性分数(Mertens et al., 2020), 但当基于熟悉度和回忆记忆的信心评级来划分击中率时, 无论效价如何, taVNS 相较于伪刺激提高了健康大学生对情绪词的回忆表现(Giraudier et

al., 2020)。Ventura-Bort 等(2021)利用 taVNS 发现了情绪记忆比中性记忆更容易记忆的潜在机制。他们在健康大学生暴露于情绪唤醒和中性场景期间施加连续 taVNS, 并在 1 周后检验其长期记忆。结果表明, 相较于伪刺激, taVNS 提高情绪材料而不是中性材料的记忆表现; 编码期间的脑电位揭示了 taVNS 促进了情绪场景的记忆识别且影响了情绪场景提取期间更大的回忆相关脑电。5) 恐惧记忆。Burger 及其同事 (Burger, Van Diest et al., 2019; Burger, Verkuil et al., 2016)实施的两项研究发现, taVNS 有助于加速健康大学生恐惧记忆的消退。Burger 等(2016)对 31 名健康大学生实施恐惧条件作用后随机分配接受 taVNS 或伪刺激, 他们发现相较于伪刺激, 接受 taVNS 的参与者在恐惧条件作用 24 小时后有加速消除恐惧的效果(but see Burger et al., 2018 for non-replication)。进一步研究表明, 接受 taVNS 的健康大学生主观报告更高的恐惧消退水平, 但 taVNS 不影响恐惧增强惊吓反应(Burger et al., 2019)。

2.5. 思维

提升创造力既是个人需要也是社会需求。创造性思维是发散思维和聚合思维的统一体, 且发散思维是创造性思维的主要成分。Colzato, Ritter 和 Steenbergen (2018)评估了 taVNS 对健康大学生的发散思维(通过非常规使用任务评估)和聚合思维(通过远距离联系测验、创造性问题解决和观点选择任务三个任务评估)的影响。结果表明, 相较于伪刺激, taVNS 提高了发散思维的表现。

问题解决是思维活动的另一个重要表现形式。研究发现, 与接受伪刺激相比, 接受 tcVNS 的健康成人在视觉空间推理任务和强迫选择识别任务上有着更好的表现(Klaming et al., 2022)。具体来说, 接受 tcVNS 的个体可以在矩阵推理任务的容易和困难项目上有着更高的准确率, 且在强迫选择任务中有着更少的错误。

人们的决策行为也可受到 tVNS 的调节: 1) 错误后减慢(post-error slowing, PES)。速度 - 准确性权衡原则表明, 人们会为了保证反应准确性而牺牲反应速度。PES 是速度 - 准确性权衡原则的一个体现, 它是指人们在犯错后往往会减缓反应速度的现象。Sellaro, van Leusden 等(2015)评估了 taVNS 对健康大学生在 flanker 任务和听觉四项选择反应时任务 PES 的影响。研究表明, taVNS 相较于伪刺激增大了 PES。然而, Borges 等(2021)发现 taVNS 刺激位置对健康大学生 PES 的影响不存在显著差异。2) 决策动机。Kühnel 等(2020)利用 go/nogo 强化学习范式考察了 taVNS 对健康参与者夜间禁食后的接近和回避行为的作用。结果显示, taVNS 严重损害决策, 尤其是降低被惩罚后的学习速率。3) 跨期决策。根据躯体标记假设, 情绪可以通过迷走神经传递并最终影响决策。据此, Steenbergen 等(2020)考察了 taVNS 对健康参与者决策冲动性的影响。他们发现, 相较于伪刺激, taVNS 对奖赏折扣的影响依赖于积极情绪的唤醒度。具体而言, 当且仅当个体处在较低唤醒水平的积极情绪时, taVNS 才能提高个体的折扣率。

2.6. 社会认知

正确识别和解码他人情绪的能力是社会认知的一个重要方面。多层迷走神经理论提出, 迷走神经是调节情绪和社会行为的种系发生的关键基础。Colzato 等(2017)首次利用“以眼读心”测验证实 taVNS 可以提高健康大学生解码他人情绪的能力, 但仅限于对容易项目的情绪识别。tVNS 和情绪识别之间的因果联系是否可以推广到整个面孔和身体表情? Sellaro 等(2018)比较了 taVNS 对健康年轻人识别静态面部和身体表情的影响发现, taVNS 增强了面部而不是身体情绪识别。Maraver 等(2020)在快速序列视觉呈现任务中向健康大学生呈现不同效价的情绪面孔。结果发现, taVNS 对情绪识别的影响主要取决于对直接注视(凸显的社会线索)的注意。进一步研究表明, taVNS 使唾液催产素分泌水平和对鼻子区域的注视时长呈正相关(Zhu et al., 2022)。然而, 人们在现实生活中经常要从动态变化的身体中识别情绪。Steenbergen 等(2021)为此考察了 taVNS 对健康年轻人静态和动态身体情绪识别能力的影响。他们发现, 不管是静态还

是动态身体表情, 相较于伪刺激, taVNS 增强了对愤怒情绪的识别能力但削弱了对悲伤表情的识别能力。

认知重评是自我情绪调节的有效策略之一。Ferstl 等(2021)考察了 taVNS 如何影响消耗精力后的健康参与者的情绪恢复。他们发现, taVNS 提高了个体在消耗体力和脑力后的积极情绪但仅在后刺激阶段出现, 且 taVNS 可以更大程度上提高处于较低基线水平积极情绪个体的动机。更为直接的证据表明, taVNS 能够使健康参与者更好地采用认知重评策略且对情绪诱发图片的反应评价为不紧张(De Smet et al., 2021)。

最近, 基于对宗教性和精神性研究兴趣的增长, Finisguerra 等(2019)利用 taVNS 揭示了皮质下和皮质内侧区域与外显和内隐宗教性/精神性表征之间的因果关系。他们分别采用问卷和内隐联系测验对 24 名意大利籍莱顿大学学生的宗教性、精神性和自尊进行外显和内隐测量。研究表明, 相较于伪刺激, taVNS 减少了自我和精神性之间自动联系的强度。

2.7. 小结

综上, 一系列实证研究表明, tVNS 对认知功能的多个领域具有提升作用, 但并非可以增强所有认知领域的表现, 即使对于同一认知领域也存在不一致的结果。tVNS 的刺激作用之所以存在差异, 原因可能是它的效果依赖于多种影响因素, 如 tVNS 刺激参数设置、所选取的认知范式以及参与者个人特点。为了更好地探究 tVNS 的刺激效果, 未来需要精细化 tVNS 研究设计。

3. 经皮迷走神经刺激的应用

3.1. 经皮迷走神经刺激调节饮食行为

想要保持好身材, 饮食是关键。迷走神经在调节食物摄取中起着至关重要的作用, 迷走神经传入信号可能通过负稳态反馈机制调节食物线索反应性。Obst 等(2020)首次探究了 taVNS 如何作用于认知加工而对饮食行为产生影响。在接受 2 h taVNS 或伪刺激后, 健康参与者观看一个由食物和客体图片组成的 oddball 任务, 其观看时的脑电数据被同步记录。遗憾的是, 他们发现, taVNS 的作用效果并非特异于食物图片且不影响食物摄取, 但伪刺激条件下 P2 振幅与食物摄取量之间成显著负相关。此外, taVNS 并不影响健康参与者对食物喜好度的主观评价(Müller et al., 2022)。但有研究发现, taVNS 可增加健康参与者对低热量食物的喜爱(Öztürk et al., 2020)。Alicart 等(2021)使用功能性核磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)进一步评估了 taVNS 对健康女性食物相关刺激神经加工的潜在效果。fMRI 结果表明 taVNS 对食物图片加工产生了调节效应, 但行为学证据显示 taVNS 使参与者对食物图片喜好度下降却不影响食物消耗量。Altinkaya 等(2022)比较了不同位置 taVNS 对 14 名健康参与者在饥饿和饱食状态下的自主神经输出(心率变异性)和传出代谢(胃蠕动频率和基础能量消耗)的影响。他们发现: 1) 饮用可口的饮料前, 参与者处于饥饿状态, taVNS 的刺激位置对胃蠕动频率和基础能量消耗的影响没有显著差异, 但位于耳甲艇的 taVNS 降低了心率变异性 and 参与者对喝饮料欲望的评价; 2) 饮用可口的饮料后, taVNS 不影响胃蠕动频率, 且无论刺激位置如何都会增加基础能量消耗, 除了耳甲艇外的其他位置都会导致心率变异性降低。这些结果表明, 饥饿状态下, 位于耳甲艇的 taVNS 对迷走神经张力的影响与消耗食物时相似, 即降低心率变异性。实际上, 食物之所以能让人们大快朵颐, 往往是因为它色香味俱全。现有研究考虑到了食物的视觉特征以及口味, 但忽视了 tVNS 可能对食物气味的感知影响。因此, 未来研究应综合考虑食物的色香味形来考察 tVNS 对健康人饮食行为的调节作用。

3.2. 经皮迷走神经刺激调节亲社会行为

亲社会行为是人类得以成功生存和繁衍的重要前提, 而高水平共情是促使人们表现出亲社会行为的一个潜在机制。Sellaro, Steenbergen 等(2015)考察了 taVNS 是否有可能增强在线抛球游戏中健康大学生

的亲社会行为。在他们的研究中, 游戏共包含两部分, 每个部分有三个 block, 两部分唯一的不同在于第三个 block 中包含附加操纵: 受社会排斥个体的面部表情从中性变得悲伤或始终保持中性。结果表明, taVNS 并不直接调节在线抛球游戏的替代性排斥反应, 也就是说, 相较于伪刺激, taVNS 下的参与者并没有把更多的球抛给未知的受社会排斥者。Oehrman 等(2022)则利用囚徒困境博弈来探讨 taVNS 对 19 位癫痫长期无发作患者合作行为的影响。他们同时评估了诸如性别、年龄等被试特征对刺激效果的影响。此外, 他们还将参与者的五大人格特质(神经质、外向性、开放性、宜人性和责任心)纳入分析。结果如下: 1) 相较于伪刺激, taVNS 增强了合作行为; 2) 性别影响合作行为和刺激效果, 即女性比男性更有可能选择合作; 3) taVNS 对合作的影响与特定人格特质产生交互作用, 具体来说, 刺激效果随着参与者神经质水平的提高而减小。由于癫痫患者存在脑功能缺陷, taVNS 或许只能改善而不能增强脑功能, 因而这样的结果可能并不适用于健康人。但若综合上述两项研究结果而轻率得出 taVNS 对健康人亲社会行为没有作用的结论则是不严谨的。未来研究需要考虑亲社会行为的其他指标、健康参与者的个人特点并变化 tVNS 的刺激参数来考察 tVNS 对健康人亲社会行为的影响。

4. 未来研究方向

4.1. 丰富刺激参数设置

目前, 虽然有关 tVNS 刺激参数设置的研究还有所欠缺, 但已经出现一些可喜的变化: 1) 刺激位置。采用 fMRI 比较 tVNS 刺激内耳屏、耳道下后壁、耳甲艇和耳垂四个位置的影响后发现, 刺激耳甲艇能最大限度激活迷走神经通路(Yakunina et al., 2017)。更进一步地, Borges 等(2021)考察了 tVNS 两个刺激位置(耳屏和耳甲艇)的生理心理效果, Altinkaya 等(2022)还考察了 tVNS 四个不同刺激位置(耳甲艇、耳屏、耳垂以及耳屏 + 耳甲艇)对饥饿和饱腹状态的影响。2) 刺激频率。采用脑磁图(magnetoencephalography, MEG)测量大脑对 tVNS 的反应发现, 不同的刺激频率可能导致大脑反应的差异, 大脑也会根据刺激频率在不同的解剖区域作出反应(Keatch et al., 2022)。此外, Sclocco 等(2020)表明 100 Hz 相较于其他低刺激频率能诱发最强的脑干反应。3) 刺激强度。Tona 等(2020)考察了 tVNS 两种刺激强度(0.5 mA 和 1.0 mA)对任务转换的影响。当然, 还有一些研究考虑到了 tVNS 其他刺激参数设置, 如刺激侧(左耳或右耳)、脉冲宽度、刺激时长、刺激连续性、伪刺激位置等。由于刺激参数会影响认知增强效果(Ridgewell et al., 2021), 但鉴于现有研究还只是处于初步探索阶段, 依然有很多未知问题需要解答。未来研究应在精细化 tVNS 刺激参数基础上结合电生理和脑功能成像技术来探讨如何使 tVNS 效用得以最大化。

4.2. 选取恰当测量指标

正如前所述, tVNS 作为一种神经调控技术可能主要通过调节 NE、 γ -GABA 等神经递质的浓度来影响认知。但是, 生理过程与心理过程并非一一对应的关系, 因而必须选取恰当的测量指标来评估生理心理的相关变化。近来, 作为 LC-NE 网络活动生物标记物——瞳孔直径(pupil dilation, PD)受到广泛关注。虽然几项研究(Borges et al., 2021; Burger et al., 2020; Keute, Demirezen et al., 2019; Warren et al., 2019; Zhu et al., 2022)并没有发现 taVNS 显著增大 PD。但 Sharon 等(2020)表明 taVNS 诱发了健康参与者的 PD 增大。经过系统比较 taVNS 不同刺激强度并同时评估照明条件对 PD 的影响后发现, 相较于基线和 2 mA 控制条件, 2 mA taVNS 导致显著更大的 PD (Capone et al., 2021)。此外, taVNS 可依据刺激前 PD 调节目标相关 PD (Villani et al., 2022)。

4.3. 考量个体差异变量

大多数认知增强研究假设人们或多或少可以通过相同的认知增强干预手段获得相同程度的收益, 但

这种假设并非总是合理的(Colzato, 2018)。由于每个人的先天遗传基础存在差异且在发育过程中受到不同环境的影响, 因而每个个体所能达到的最大潜能不可能是完全一致的。正因如此, 认知增强干预技术对认知的影响可能遵循非线性原则(the principle of nonlinearity; Colzato et al., 2021)。例如, 相同刺激强度的 tVNS, 对于甲来说恰好能够使其达到最佳表现, 但对于乙来说可能不足以使其达到最佳表现甚至有可能损害其认知表现。为了使 tVNS 能够有效增强个体的认知, 必须将个体差异变量(如年龄、性别、受教育程度等)纳入到 tVNS 增强认知的研究设计之中, 从而使未来商业化的 tVNS 设备为用户提供更加个性化且高效精准的服务体验。这对于其他认知增强技术手段来说同样如此。

4.4. 联合其他认知增强技术

根据神经竞争原则(the principle of neural competition), 目标认知功能的提高有可能导致其他认知功能的削弱(Colzato et al., 2021)。因此, 可以这样认为, 任何单一的认知增强技术都不足以使认知的所有方面都得到增强, 即使是针对认知的某一领域, 单一的认知增强方法和技术可能也达不到个体最佳效果。譬如有研究者(Rufener et al., 2018)比较了 taVNS 和经颅随机噪声刺激(transcranial random noise stimulation, tRNS)对听觉选择性注意的影响。他们发现, 相较于伪刺激, taVNS 增大了 P3 振幅, 而 tRNS 减少了对目标刺激的反应时, 且两种技术都减少了 P3 潜伏期。再如, 一项元分析研究(Ridgewell et al., 2021)表明, 相较于其他认知功能, taVNS 对执行功能有显著的增强效果。未来应将 tVNS 与其他认知增强手段(如认知训练、NIBS 技术、生物反馈训练、营养补充剂等)相结合以探讨其对认知提升的作用。例如, Wang 等(2022)联合抑制控制训练(inhibitory control training, ICT)和 tVNS 检验其对抑制控制的增强效果。他们将 58 名年轻男性大学生随机分成四组: ICT + tVNS, ICT + 伪 tVNS, 伪 ICT + tVNS, 伪 ICT + 伪 tVNS。参与者按顺序完成训练前、训练和训练后测验。结果表明, 相较于其他组, ICT + tVNS 显著提高了参与者在停止 - 信号任务和 go/no-go 任务上的训练和近迁移效果; 但四个组均没有在 Stroop 任务上表现出远迁移效果。

参考文献

- 方继良, 洪洋, 范洋洋, 刘军, 马云遥, 徐春华, 等(2014). 经皮电针刺激正常人耳甲迷走神经的功能 MRI 脑效应研究. *磁共振成像*, 5(6), 416-422.
- 顾楠楠, 李春波(2020). 经皮迷走神经刺激术研究进展. *上海交通大学学报: 医学版*, 40(4), 539-542.
- 康君伟, 董晓阳, 汤运梁, 王珺, 冯珍(2022). 迷走神经电刺激治疗慢性意识障碍的临床疗效及潜在机制研究进展. *中国康复医学杂志*, 37(8), 1137-1141.
- 游旭群, 杨畅, 罗扬眉(2019). 基于非侵入性脑刺激的认知增强: 方法、伦理和应用. *心理科学*, 42(4), 813-819.
- Alicart, H., Heldmann, M., Göttlich, M., Obst, M. A., Tittgemeyer, M., & Münte, T. F. (2021). Modulation of Visual Processing of Food by Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS). *Brain Imaging and Behavior*, 15, 1886-1897. <https://doi.org/10.1007/s11682-020-00382-8>
- Altınkaya, Z., Öztürk, L., Büyükgüdük, İ., Yanık, H., Yılmaz, D. D., Yar, B. et al. (2022). Non-Invasive Vagus Nerve Stimulation in a Hungry State Decreases Heart Rate Variability and Wanting of a Palatable Drink. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.05.18.492424>
- Badran, B. W., Alfred, B. Y., Adair, D., Mappin, G., DeVries, W. H., Jenkins, D. D. et al. (2018). Laboratory Administration of Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation (taVNS): Technique, Targeting, and Considerations. *Journal of Visualized Experiments*, 143, e58984. <https://doi.org/10.3791/58984>
- Beste, C., Steenbergen, L., Sellaro, R., Grigoriadou, S., Zhang, R., Chmielewski, W., Stock, A.-K., & Clozato, L. (2016). Effects of Concomitant Stimulation of the Gabaergic and Norepinephrine System on Inhibitory Control—A Study Using Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation. *Brain Stimulation*, 9, 811-818. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.07.004>
- Borges, U., Knops, L., Laborde, S., Klatt, S., & Raab, M. (2020). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation May Enhance Only Specific Aspects of the Core Executive Functions. A Randomized Crossover Trial. *Frontiers in Neuroscience*, 14, Article 523. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00523>

- Borges, U., Pfannenstiel, M., Tsukahara, J., Laborde, S., & Raab, M. (2021). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation via Tragus or Cymba Conchae: Are Its Psychophysiological Effects Dependent on the Stimulation Area? *International Journal of Psychophysiology*, *161*, 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.01.003>
- Burger, A. M., Van der Does, W., Brosschot, J. F., & Verkuil, B. (2020). From Ear to Eye? No Effect of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation on Human Pupil Dilation: A Report of Three Studies. *Biological Psychology*, *152*, Article 107863. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2020.107863>
- Burger, A. M., Van Diest, I., Van der Does, W., Hysaj, M., Thayer, J. F., Brosschot, J. F., & Verkuil, B. (2018). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation and Extinction of Prepared Fear: A Conceptual Non-replication. *Scientific Reports*, *8*, Article No. 11471. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29561-w>
- Burger, A. M., Van Diest, I., Van der Does, W., Korbee, J. N., Waziri, N., Brosschot, J. F., & Verkuil, B. (2019). The Effect of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation on Fear Generalization and Subsequent Fear Extinction. *Neurobiology of Learning and Memory*, *161*, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2019.04.006>
- Burger, A. M., Verkuil, B., Van Diest, I., Van der Does, W., Thayer, J. F., & Brosschot, J. F. (2016). The Effects of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation on Conditioned Fear Extinction in Humans. *Neurobiology of Learning and Memory*, *132*, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2016.05.007>
- Butt, M. F., Albusoda, A., Farmer, A. D., & Aziz, Q. (2020). The Anatomical Basis for Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation. *Journal of Anatomy*, *236*, 588-611. <https://doi.org/10.1111/joa.13122>
- Capone, F., Assenza, G., Di Pino, G., Musumeci, G., Ranieri, F., Florio, L. et al. (2015). The Effect of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation on Cortical Excitability. *Journal of Neural Transmission*, *122*, 679-685. <https://doi.org/10.1007/s00702-014-1299-7>
- Capone, F., Motolese, F., Zazzo, A. D., Antonini, M., & Lazzaro, V. D. (2021). The Effects of Transcutaneous Auricular Vagal Nerve Stimulation on Pupil Size. *Clinical Neurophysiology*, *132*, 1859-1865. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2021.05.014>
- Colzato, L. S. (2018). Responsible Cognitive Enhancement: Neuroethical Considerations. *Journal of Cognitive Enhancement*, *2*, 331-334. <https://doi.org/10.1007/s41465-018-0090-3>
- Colzato, L. S., Hommel, B., & Beste, C. (2021). The Downsides of Cognitive Enhancement. *The Neuroscientist*, *27*, 322-330. <https://doi.org/10.1177/1073858420945971>
- Colzato, L. S., Ritter, S. M., & Steenbergen, L. (2018). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Enhances Divergent Thinking. *Neuropsychologia*, *111*, 72-76. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.003>
- Colzato, L. S., Sellaro, R., & Beste, C. (2017). Darwin Revisited: The Vagus Nerve Is a Causal Element in Controlling Recognition of Other's Emotions. *Cortex*, *92*, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.03.017>
- Colzato, L. S., Wolters, G., & Peifer, C. (2018). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Modulates Flow Experience. *Experimental Brain Research*, *236*, 253-257. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5123-0>
- Colzato, L., & Beste, C. (2020). A Literature Review on the Neurophysiological Underpinnings and Cognitive Effects of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation: Challenges and Future Directions. *Journal of Neurophysiology*, *123*, 1739-1755. <https://doi.org/10.1152/jn.00057.2020>
- Cristancho, P., Cristancho, M. A., Baltuch, G. H., Thase, M. E., & John, P. O. (2011). Effectiveness and Safety of Vagus Nerve Stimulation for Severe Treatment-Resistant Major Depression in Clinical Practice after FDA Approval: Outcomes at 1 Year. *The Journal of Clinical Psychiatry*, *72*, Article 5594. <https://doi.org/10.4088/JCP.09m05888blu>
- De Smet, S., Baeken, C., Seminck, N., Tilleman, J., Carrette, E., Vonck, K., & Vanderhasselt, M.-A. (2021). Non-Invasive Vagal Nerve Stimulation Enhances Cognitive Emotion Regulation. *Behaviour Research and Therapy*, *145*, Article 103933. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103933>
- Ferstl, M., Teckentrup, V., Lin, W. M., Kräutlein, F., Kühnel, A., Klaus, J., Walter, M., & Kroemer, N. B. (2021). Non-Invasive Vagus Nerve Stimulation Boosts Mood Recovery after Effort Exertion. *Psychological Medicine*, *52*, 3029-3039. <https://doi.org/10.1017/S0033291720005073>
- Finisguerra, A., Crescentini, C., & Urgesi, C. (2019). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Affects Implicit Spiritual Self-Representations. *Neuroscience*, *412*, 144-159. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.05.059>
- Fischer, R., Ventura-Bort, C., Hamm, A., & Weymar, M. (2018). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Enhances Conflict-Triggered Adjustment of Cognitive Control. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, *18*, 680-693. <https://doi.org/10.3758/s13415-018-0596-2>
- Frangos, E., Ellrich, J., & Komisaruk, B. R. (2015). Non-Invasive Access to the Vagus Nerve Central Projections via Electrical Stimulation of the External Ear: fMRI Evidence in Humans. *Brain Stimulation*, *8*, 624-636. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.11.018>
- Giraudier, M., Ventura-Bort, C., & Weymar, M. (2020). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Improves High-

- Confidence Recognition Memory but Not Emotional Word Processing. *Frontiers in Psychology*, *11*, Article 1276. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01276>
- He, W., Jing, X. H., Zhu, B., Zhu, X. L., Li, L., Bai, W. Z., & Ben, H. (2013). The Auriculo-Vagal Afferent Pathway and Its Role in Seizure Suppression in Rats. *BMC Neuroscience*, *14*, Article No. 85. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-85>
- Jacobs, H. I. L., Riphagen, J. M., Razat, C. M., Wiese, S., & Sack, A. T. (2015). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Boosts Associative Memory in Older Individuals. *Neurobiology of Aging*, *36*, 1860-1867. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2015.02.023>
- Jongkees, B. J., Immink, M. A., Finisguerra, A., & Colzato, L. S. (2018). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Enhances Response Selection during Sequential Action. *Frontiers in Psychology*, *9*, Article 1159. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01159>
- Kaan, E., De Aguiar, I., Clarke, C., Lamb, D. G., Williamson, J. B., & Porges, E. C. (2021). A Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Study on Verbal Order Memory. *Journal of Neurolinguistics*, *59*, Article 100990. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2021.100990>
- Keatch, C., Lambert, E., Woods, W., & Kameneva, T. (2022). Measuring Brain Response to Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Using Simultaneous Magnetoencephalography (MEG). *Journal of Neural Engineering*, *19*, Article 026038. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac620c>
- Keute, M., Barth, D., Liebrand, M., Heinze, H. J., Kraemer, U., & Zaehle, T. (2020). Effects of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) on Conflict-Related Behavioral Performance and Frontal Midline Theta Activity. *Journal of Cognitive Enhancement*, *4*, 121-130. <https://doi.org/10.1007/s41465-019-00152-5>
- Keute, M., Boehrer, L., Ruhnau, P., Heinze, H.-J., & Zaehle, T. (2019). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) and the Dynamics of Visual Bistable Perception. *Frontiers in Neuroscience*, *13*, Article 227. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00227>
- Keute, M., Demirezen, M., Graf, A., Mueller, N. G., & Zaehle, T. (2019). No Modulation of Pupil Size and Event-Related Pupil Response by Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation (taVNS). *Scientific Reports*, *9*, Article No. 11452. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47961-4>
- Keute, M., Ruhnau, P., Heinze, H. J., & Zaehle, T. (2018). Behavioral and Electrophysiological Evidence for GABAergic Modulation through Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation. *Clinical Neurophysiology*, *129*, 1789-1795. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.05.026>
- Klaming, R., Simmons, A. N., Spadoni, A. D., & Lerman, I. (2022). Effects of Noninvasive Cervical Vagal Nerve Stimulation on Cognitive Performance but Not Brain Activation in Healthy Adults. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, *25*, 424-432. <https://doi.org/10.1111/ner.13313>
- Konjusha, A., Colzato, L., Mückschel, M., & Beste, C. (2022). Auricular Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Diminishes Alpha-Band-Related Inhibitory Gating Processes during Conflict Monitoring in Frontal Cortices. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, *25*, 457-467. <https://doi.org/10.1093/ijnp/pyac013>
- Kreuzer, P. M., Landgrebe, M., Husser, O., Resch, M., Schecklmann, M., Geisreiter, F., Poepl, T. M. et al. (2012). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation: Retrospective Assessment of Cardiac Safety in a Pilot Study. *Frontiers in Psychiatry*, *3*, Article 70. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00070>
- Kühnel, A., Teckentrup, V., Neuser, M. P., Huys, Q. J. M., Burrasch, C., Walter, M., & Kroemer, N. B. (2020). Stimulation of the Vagus Nerve Reduces Learning in A Go/No-Go Reinforcement Learning Task. *European Neuropsychopharmacology*, *35*, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2020.03.023>
- Llanos, F., McHaney, J. R., Schuerman, W. L., Yi, H. G., Leonard, M. K., & Chandrasekaran, B. (2020). Non-Invasive Peripheral Nerve Stimulation Selectively Enhances Speech Category Learning in Adults. *NPJ Science of Learning*, *5*, Article No. 12. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-0070-0>
- Maraver, M. J., Steenbergen, L., Hossein, R., Actis-Grosso, R., Ricciardelli, P., Hommel, B., & Colzato, L. S. (2020). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Modulates Attentional Resource Deployment towards Social Cues. *Neuropsychologia*, *143*, Article ID: 107465. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107465>
- Mertens, A., Naert, L., Miatton, M., Poppa, T., Carrette, E., Gadeyne, S., Raedt, R., Boon, P., & Vonck, K. (2020). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Does Not Affect Verbal Memory Performance in Healthy Volunteers. *Frontiers in Psychology*, *11*, Article 551. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00551>
- Müller, F. K., Teckentrup, V., Kühnel, A., Ferstl, M., & Kroemer, N. B. (2022). Acute Vagus Nerve Stimulation Does Not Affect Liking or Wanting Ratings of Food in Healthy Participants. *Appetite*, *169*, Article ID: 105813. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105813>
- Obst, M. A., Heldmann, M., Alicart, H., Tittgemeyer, M., & Münte, T. F. (2020). Effect of Short-Term Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) on Brain Processing of Food Cues: An Electrophysiological Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*, Article 206. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00206>

- Oehrn, C. R., Molitor, L., Krause, K., Niehaus, H., Schmidt, L., Hakel, L. et al. (2022). Non-Invasive Vagus Nerve Stimulation Enhances Cooperative Behavior in Humans. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1319033/v1>
- Öztürk, L., Büning, P. E., Frangos, E., de Lartigue, G., & Veldhuizen, M. G. (2020). tVNS Increases Liking of Orally Sampled Low-Fat Foods: A Pilot Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, Article 600995. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.600995>
- Redgrave, J., Day, D., Leung, H., Laud, P. J., Ali, A., & Lindert, R., & Majid, A. (2018). Safety and Tolerability of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation in Humans: A Systematic Review. *Brain Stimulation*, 11, 1225-1238. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.08.010>
- Richter, F., García, A. M., Rodriguez Arriagada, N., Yoris, A., Birba, A., Huepe, D. et al. (2020). Behavioral and Neurophysiological Signatures of Interoceptive Enhancements Following Vagus Nerve Stimulation. *Human Brain Mapping*, 42, 1227-1242. <https://doi.org/10.1002/hbm.25288>
- Ridgewell, C., Heaton, K. J., Hildebrandt, A., Couse, J., Leeder, T., & Neumeier, W. H. (2021). The Effects of Transcutaneous Auricular Vagal Nerve Stimulation on Cognition in Healthy Individuals: A Meta-Analysis. *Neuropsychology*, 35, 352-365. <https://doi.org/10.1037/neu0000735>
- Rufener, K. S., Geyer, U., Janitzky, K., Heinze, H. J., & Zaehle, T. (2018). Modulating Auditory Selective Attention by Non-Invasive Brain Stimulation: Differential Effects of Transcutaneous Vagal Nerve Stimulation and Transcranial Random Noise Stimulation. *European Journal of Neuroscience*, 48, 2301-2309. <https://doi.org/10.1111/ejn.14128>
- Sclocco, R., Garcia, R. G., Kettner, N. W., Fisher, H. P., Isenburg, K., Makarovskiy, M. et al. (2020). Stimulus Frequency Modulates Brainstem Response to Respiratory-Gated Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation. *Brain Stimulation*, 13, 970-978. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.03.011>
- Sellaro, R., de Gelder, B., Finisguerra, A., & Colzato, L. S. (2018). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Enhances Recognition of Emotions in Faces but Not Bodies. *Cortex*, 99, 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.11.007>
- Sellaro, R., Steenbergen, L., Verkuil, B., van IJzendoorn, M. H., & Colzato, L. S. (2015). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Does Not Increase Prosocial Behavior in Cyberball. *Frontiers in Psychology*, 6, Article 499. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00499>
- Sellaro, R., van Leusden, J. W., Tona, K. D., Verkuil, B., Nieuwenhuis, S., & Colzato, L. S. (2015). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Enhances Post-Error Slowing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 2126-2132. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00851
- Sharon, O., Fahoum, F., & Nir, Y. (2020). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation in Humans Induces Pupil Dilation and Attenuates Alpha Oscillations. *Journal of Neuroscience*, 41, 320-330. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1361-20.2020>
- Steenbergen, L., Colzato, L. S., & Maraver, M. J. (2020). Vagal Signaling and the Somatic Marker Hypothesis: The Effect of Transcutaneous Vagal Nerve Stimulation on Delay Discounting Is Modulated by Positive Mood. *International Journal of Psychophysiology*, 148, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.10.010>
- Steenbergen, L., Maraver, M. J., Actis-Grosso, R., Ricciardelli, P., & Colzato, L. S. (2021). Recognizing Emotions in Bodies: Vagus Nerve Stimulation Enhances Recognition of Anger while Impairing Sadness. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 21, 1246-1261. <https://doi.org/10.3758/s13415-021-00928-3>
- Steenbergen, L., Sellaro, R., Stock, A. K., Verkuil, B., Beste, C., & Colzato, L. S. (2015). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation (tVNS) Enhances Response Selection during Action Cascading Processes. *European Neuropsychopharmacology*, 25, 773-778. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2015.03.015>
- Sun, J. B., Cheng, C., Tian, Q. Q., Yuan, H., Yang, X. J., Deng, H. et al. (2021). Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation Improves Spatial Working Memory in Healthy Young Adults. *Frontiers in Neuroscience*, 15, Article 790793. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.790793>
- Tona, K. D., Revers, H., Verkuil, B., & Nieuwenhuis, S. (2020). Noradrenergic Regulation of Cognitive Flexibility: No Effects of Stress, Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation, and Atomoxetine on Task-Switching in Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32, 1881-1895. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01603
- van Leusden, J. W. R., Sellaro, R., & Colzato, L. S. (2015). Transcutaneous Vagal Nerve Stimulation (tVNS): A New Neuromodulation Tool in Healthy Humans? *Frontiers in Psychology*, 6, Article 102. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00102>
- Ventura-Bort, C., Wirkner, J., Wendt, J., Hamm, A. O., & Weymar, M. (2021). Establishment of Emotional Memories Is Mediated by Vagal Nerve Activation: Evidence from Noninvasive taVNS. *The Journal of Neuroscience*, 41, 7636-7648. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2329-20.2021>
- Ventureyra, E. C. (2000). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation for Partial Onset Seizure Therapy: A New Concept. *Child's Nervous System*, 16, 101-102. <https://doi.org/10.1007/s003810050021>
- Villani, V., Finotti, G., Di Lernia, D., Tsakiris, M., & Azevedo, R. T. (2022). Event-Related Transcutaneous Vagus Nerve

-
- Stimulation Modulates Behaviour and Pupillary Responses during an Auditory Oddball Task. *Psychoneuroendocrinology*, 140, Article ID: 105719. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2022.105719>
- Villani, V., Tsakiris, M., & Azevedo, R. T. (2019). Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Improves Interoceptive Accuracy. *Neuropsychologia*, 134, Article ID: 107201. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107201>
- Wang, C., Cao, X., Gao, Z., Liu, Y., & Wen, Z. (2022). Training and Transfer Effects of Combining Inhibitory Control Training with Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation in Healthy Adults. *Frontiers in Psychology*, 13, Article 858938. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.858938>
- Warren, C. M., Tona, K. D., Ouwerkerk, L., Van Paridon, J., Poletiek, F., van Steenbergen, H. et al. (2019). The Neuromodulatory and Hormonal Effects of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation as Evidenced by Salivary Alpha Amylase, Salivary Cortisol, Pupil Diameter, and the P3 Event-Related Potential. *Brain Stimulation*, 12, 635-642. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.224>
- Yakunina, N., Kim, S. S., & Nam, E. C. (2017). Optimization of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Using Functional MRI. *Neuromodulation*, 20, 290-300. <https://doi.org/10.1111/ner.12541>
- Zhu, S., Zhang, X., Qing, Y., Zhang, Y., Yao, S., Kendrick, K., & Zhao, W. (2022). Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation Increases Eye-Gaze on Salient Facial Features and Oxytocin Release. *Psychophysiology*, 59, e14107. <https://doi.org/10.1111/psyp.14107>