

# 心率变异性与认知控制的关系\*

陈秀文<sup>1</sup>, 李富洪<sup>2</sup>, 魏鲁庆<sup>2</sup>

(1. 惠州市第二人民医院, 惠州 516000; 2. 江西师范大学心理学院, 南昌 330022)

**摘要:**根据神经内脏整合模型,反映迷走神经活动的心率变异性(heart rate variability, HRV)可以预测个体认知控制任务的表现,二者存在共同的神经基础。通过对HRV和认知控制的相关性、相互影响及其神经机制进行归纳和总结,发现HRV与认知控制之间存在正相关关系,即个体的HRV水平越高,认知控制任务表现越好。此外,二者之间存在相互影响,认知控制训练可以改变HRV水平,HRV干预技术(如经皮迷走神经刺激技术或HRV生物反馈训练)能够改善认知控制能力。以上正相关关系和相互影响作用的存在,可能是由于二者都受到来自前额叶-皮层下回路的调控。因此,利用HRV干预技术重塑前额叶-皮层下回路之间的连接,能够帮助改善个体的迷走神经调节功能和认知控制能力,为探讨心率变异性和认知控制的关系提供了新视角。

**关键词:**神经内脏整合模型;心率变异性;认知控制;前额叶-皮层下回路

**中图分类号:**B842.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1003-5184(2023)02-0117-07

## 1 引言

心率变异性(Heart rate variability, HRV)是指逐次心跳间期的波动水平,源自自主神经系统对窦房结的调控作用,能够反映交感神经和迷走神经活动的紧张性和均衡性,可以通过计算逐次心跳间隔时间的变化来获取,具有无创、可定量和重复性强的特点(Sztajzel, 2004)。其中,由迷走神经调控的HRV反映了个体认知、情绪和行为的调节能力,可以作为自上而下自我调节的重要生物学指标(Thayer et al., 2012; Thayer, Hansen et al., 2009)。迷走神经系统能够促进机体由应激条件下的非稳态恢复到稳态,反映了自主神经调节的灵活性,调节能力好的个体能够根据环境需求,快速产生或调整生理心理状态,这对个体的适应能力和疾病预防具有重要意义。

HRV的测量指标通常根据分析方法的不同划分为时域指标和频域指标两类。时域指标是对心电图上逐次窦性心搏间R波到R波之间的时间间隔(即R-R间期)的变化进行分析。常用的时域指标有反映自主神经系统总张力的全部正常R-R间期的标准差(standard deviation of the duration of all normal R-R intervals, SDNN)和反映迷走神经张力的全程相邻R-R间期之差的均方根(root mean square of successive differences, RMSSD)(Saul, 1990)。频域分析法也叫频谱分析法,它与时域分析法有相关性,且能揭示出心率更复杂的变化规律(Radespiel-Troger et al., 2003)。常用的频域指标有高频功率(High-frequency (HF), 0.15~0.40 Hz),低频功率(low-frequency (LF), 0.04~0.15 Hz)和低频高频比LF/HF。其中,HRV的高频功率(HF-HRV)反映迷走神经的调节作用,低频功

率(LF-HRV)反映交感和迷走神经对窦房结的共同调节作用,低高频功率比(LF/HF-HRV)则反映交感神经和迷走神经调控的均衡性(Saul, 1990)。本文探讨的是由迷走神经调控的HRV,包括RMSSD(时域)和HF-HRV(频域)这两个指标,下文描述的HRV,无特殊说明,均指由迷走神经调控的HRV。

认知控制指的是将复杂的认知与情绪活动加以整合,使其指向特定目标的心理功能,也就是在抑制不相关或不需要的信息的同时,维持激活所需要的信息,以完成目标导向行为的心理过程(Miller, 2000; Miller & Cohen, 2001)。认知控制功能由前额叶皮质进行调控,例如,外侧前额叶皮质和额极支持目标导向行为,负责任务相关信息的提取和选择,内侧前额叶皮质与外侧前额叶皮质协同工作,负责监控正在进行的活动从而调节认知控制的过程(Gazzaniga et al., 1998/2011)。

Thayer等人基于神经解剖、药物阻断和脑影像的研究提出了神经内脏整合模型(Thayer et al., 2009),该模型指出认知调节与迷走神经调节拥有共同的神经回路基础,即都受到前额叶-皮层下回路的调控。不仅如此,前额叶对皮层下结构的抑制作用能够帮助个体不断监视外在环境和恢复机体内稳态,从而对生理和认知过程产生适应性调节,HRV可以作为反映生理和认知过程整合的重要生物学指标(Thayer & Lane, 2009)。根据此模型,更高的HRV水平与更好的认知控制能力相关(Holzman & Bridgett, 2017)。

由于当前的研究采用不同的分析方法(时域指标、频域指标等)来计算HRV值,分析了不同状态(例如在休息期间、任务期间和/或恢复期间)下的

\* 基金项目:国家自然科学基金(31900764)。

通讯作者:魏鲁庆, E-mail: weiluqing@foxmail.com。

HRV 值,使用的研究任务也不同,导致已有研究结果并不完全一致(Holzman & Bridgett,2017)。为了进一步阐释迷走神经功能在认知控制任务中所扮演的角色及其作用,本文将对反映迷走神经活动的 HRV 和认知控制的相关研究进行系统地总结和归纳,得出更为可靠的研究结论。

## 2 心率变异性与认知控制的相关关系

研究发现,与静息状态下 HRV 值低的个体相比,静息 HRV 值较高的个体在认知控制有关的任务(例如 stroop 和 n-back 任务)中表现得更好(Holzman & Bridgett,2017;Mahinrad et al.,2016;Zahn et al.,2016)。认知控制包括认知灵活性(cognitive flexibility)、工作记忆(working Memory, WM)和反应抑制(response inhibition)三个子成分(Miyake et al.,2000),反映着不同的心理过程,本文将从认知控制的不同子成分入手,考察认知控制和 HRV 的关系。

### 2.1 心率变异性与认知灵活性的相关性

行动级联(Action Cascading)是一种关键的认知控制功能,是指在面对不同的任务目标时应对多种反应选项的能力,反映把不同的行动按优先级排列并串联起来的能力(Verbruggen et al.,2008)。考察行动级联的一种研究范式是停止-转换范式(Stop-Change task),该范式与停止信号任务相似,被试在停止信号出现时需立即停止当前反应,同时或经过一段时间的延迟之后切换到另一任务。该范式能够考察个体的抑制能力和迅速切换到不同响应的能力(Colzato & Steenbergen,2017)。为了探究反映迷走神经活动的 HRV 与动作级联的关系,Colzato 和 Steenbergen(2017)考查了 RMSSD 值和停止-转换范式的表现是否存在相关。结果显示,高静息 RMSSD 值的被试停止-转换任务的反应时显著短于低静息 RMSSD 值的被试。相关分析显示,当要求被试停止当前任务并同时转换到另一任务时, RMSSD 值与反应时成负相关;当停止信号和新的任务规则之间存在 300ms 的延迟时,有负相关的趋势但结果不显著。在排除性别、年龄、体重指数、焦虑水平和压力水平等因素的影响后, RMSSD 值与动作级联的相关结果依然显著,证实了被试的认知灵活性与 HRV 水平的高低存在相关性。除行动级联外,Colzato 等(2018)使用任务转换范式探讨了由迷走神经调控的 HRV 和任务转换的关系。结果表明在较短的反应刺激间隔(RSI=150ms)时, RMSSD 值和 HF-HRV 值越高,转换代价越小,两者成负相关。研究结果表明静息状态下由迷走神经调控的 HRV 的水平可以用来预测个体的认知灵活性,即 HRV 值高的个体,转换代价更低,认知灵活性更好。然而,Alba 等(2019)得到了不一致的研究结果。Alba 等人对 38 名大学生被试的 HRV 和认知灵活性进行探讨,发现静息 HRV(HF-HRV、LF-HRV、RMSSD 和 SDNN)和认知灵活性测试的错误率呈正相关。

对此,Alba 等人认为结果的不一致是由不同的实验任务难度引起的,实验任务难度越大,涉及的大脑资源越多,从而诱发更大的心率变异性活动。

以往的研究在实验范式和任务难度上存在差异,研究间的异质性较大,但研究结果大多支持了 Thayer 等人提出的神经内脏整合模型(Thayer et al.,2009;Zahn et al.,2016),即更高的静息 HRV 与更好的心理灵活性有关;更高的静息 HRV 反映更好的前额叶-皮层下回路的功能,而这个回路对于维持心理灵活性和适应性反应十分重要。

### 2.2 心率变异性与工作记忆的相关性

Hansen 等(2003)首次考察了迷走神经张力对工作记忆的影响,研究者根据基线时 RMSSD 的中值将 53 名男性海员分成高、低 HRV 两组,接受工作记忆测试(Working Memory Test, WMT)和持续操作任务(Continuous Performance Test, CPT)。结果显示,在 WMT(2-back 任务)中,高静息 HRV 组比低静息 HRV 组表现出更高的正确率。在涉及执行功能的 CPT 中,高基线 HRV 组表现出更快的反应速度和更高的正确率。这说明更高的 HRV 与更好的执行功能表现存在联系。此外,为了研究有氧运动在 HRV 与执行功能之间是否起调节作用,Hansen 等(2004)对参加 8 周训练后继续接受有氧运动训练和停止有氧运动训练的两组男性海员的 HRV(HF-HRV 值)和执行功能(WMT 和 CPT)进行了前后两次测试。测试前两组被试的最大耗氧量(maximum oxygen consumption,  $VO_{2max}$ )、HF-HRV 值以及执行功能没有差异,经过 4 周的接受或停止训练后,停止训练组的  $VO_{2max}$  较测试前显著降低, HF-HRV 值显著低于训练组。对于涉及执行功能的 CPT 任务,接受训练组表现出比训练前更高的正确率和更快的反应速度;对于 WMT(2-back 任务),训练组在后测时的正确率显著高于前测。该实验支持了由迷走神经调控的 HRV 与前额叶皮层活动之间存在密切联系,即更高的 HRV 反映了更好的前额叶皮层的调控,可以预测更好的执行功能的表现。

除此之外,不少研究也表明 HRV 和工作记忆功能之间存在正相关。例如 Gianaros 等(2004)发现 HF-HRV 的值随着工作记忆难度的增加而下降,Jennings 等(2015)发现在高加索白人,倒背数字记忆广度任务的表现和 HF-HRV 呈正相关,Laborde 等(2015)发现更高的静息 HRV 与更好的 WMT 表现相关。以上对 HRV 和工作记忆的研究结果较为一致,但忽略了性别、年龄和运动习惯等因素对二者关系的影响。据文献报道,性别、年龄和运动习惯等因素能够影响个体的 HRV 水平(Forte et al.,2019;Laborde et al.,2017;Stenfors et al.,2016)。因此,未来的研究可以进一步考察这些因素是如何影响 HRV 与工作记忆的关系。

### 2.3 心率变异性与反应抑制的相关性

反映迷走神经活动的 HRV 与反应抑制的关系

在 Jennings 等(2015)的研究中得到证实,在 363 名高加索白人中,个体的静息 HF - HRV 值越大,在完成 stroop 任务过程中的干扰效应越小,而在 70 名非洲裔美国人中,没有发现显著相关的结果,在总样本中,HF - HRV 和 stroop 任务呈正相关。此外,Alderman 和 Olson(2014)对 56 名健康大学生被试进行研究,发现任务态的 HF - HRV 和修订的 flanker 任务的反应时呈负相关。Williams 等(2016)探讨了 104 名健康年轻被试的静息 HRV (RMSSD 和 HF - HRV)和修订的 flanker 任务表现的关系。在这篇文章中,考察认知功能的指标为个体反应时变异性(intraindividual reaction time variability, IIV),IIV 指的是试次间反应时的变异性,能够反映注意的缺陷和认知功能的水平。由于使用的任务较为简单,静息 HF - HRV 和修订的 flanker 任务的反应时呈现负相关,正确率呈现正相关,但结果不显著。IIV 和静息 HF - HRV 存在中等的相关性,这表明低静息 HRV 的个体存在任务表现不稳定的风险。

当前对于 HRV 和反应抑制关系的研究结果表明二者存在正相关关系(Zahn et al., 2016),支持了神经内脏整合模型的观点。Jennings 等(2015)报道了 HRV 和反应抑制的关系存在种族差异,但类似的研究较少。不仅如此,当前的研究结论大多针对欧美国家的白人群体,缺乏中国本土化的研究。因此,种族差异对 HRV 与认知控制功能的影响还有待进一步探讨。

### 3 心率变异性与认知控制的相互影响

研究者在证实 HRV 和认知控制存在相关关系以后,利用 HRV 生物反馈训练、经皮迷走神经刺激(Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation, tVNS)技术和认知训练进一步揭示了二者之间的相互作用。HRV 生物反馈训练通常是让被试以约 10 秒一次呼吸的速度进行呼吸,这个 0.1 Hz 的呼吸频率被称为共振呼吸频率(Mather & Thayer, 2018),能够引起心率在特别高的振幅下振荡,从而提高 HRV(Lehrer et al., 2013)。近年来,tVNS 技术逐渐受到研究者的关注,它是一种通过电刺激位于声道内侧的传入性迷走神经耳支,从而引起迷走神经激活。研究证实 tVNS 技术能够有效地提高迷走神经调控的 HRV(Clancy et al., 2014),更为直接地对迷走神经及相关的认知功能之间的关系做出推论。此外,进行定期的工作记忆刷新训练也能够改变 HRV 水平,并对心理过程产生影响(Xiu et al., 2016)。

HRV 生物反馈训练可用于调节被试的 HRV 水平,从而影响其认知表现。Prinsloo 等(2011)考察了 10 分钟的 HRV 生物反馈训练对于应激条件下认知表现的影响。18 名健康男性被试被随机分配到生物反馈训练组和控制组,并在干预前后各完成一次修订的 stroop 任务,该任务要求被试完成 stroop 任务的同时记住穿插在任务中出现的方块的个数,能够同时考察执行功能的三个子成分,即工作记忆

更新、心理设置的切换以及抑制控制。结果表明 10 分钟的 HRV 生物反馈训练能够有效提高被试的认知表现。生物反馈组在干预后,对 stroop 任务的反应时下降,计数方块时错误更少,说明被试的执行功能得到提升,并且生物反馈训练组的被试比控制组感到更加的放松。另外,Wahab 等(2013)对电子制造业的操作人员进行为期 5 周的 HRV 生物反馈训练,结果显示该类人员的 HRV 水平、注意和记忆能力较干预前显著提高(Sutarto et al., 2013)。一项针对篮球运动员的研究同样显示,连续 10 天的 HRV 生物反馈干预使得运动员的焦虑水平降低、HRV 水平和篮球运动表现提高(Paul & Garg, 2012),这说明 HRV 生物反馈训练在调节情绪和认知功能方面有较好的效果。将 HRV 生物反馈、正念和体育锻炼三种干预方式进行对比,结果显示三者都能有效提高被试的注意力和执行功能,并且在干预效果上不存在差异(de Bruin et al., 2016),提供进一步的证据支持 HRV 生物反馈训练能够有效改善个体的认知功能表现。

tVNS 技术相较于 HRV 生物反馈训练,能够更为直接地刺激迷走神经,改变个体的 HRV 水平,进而对其认知控制能力产生影响。Steenbergen 等(2015)考察了即时的 tVNS 刺激对动作级联的影响。15 名健康大学生被试在执行停止 - 转换任务的同时,接受 30 秒 tVNS 刺激和 30 秒休息的交替干预,另外 15 名被试则接受虚假的 tVNS 刺激。结果显示,在需要停止反应并转换到另一任务时,真实刺激组被试的反应时显著快于虚假刺激组,该研究表明 tVNS 刺激技术通过提高个体的 HRV 水平,增强被试在动作级联过程中的反应选择能力和迅速切换到不同响应的功能。在一项使用西蒙任务(Simon task)的研究中,相较于虚假刺激,tVNS 刺激使冲突效应减弱,表明 tVNS 技术能够增强冲突触发的认知控制调节(Fischer et al., 2018)。此外,一项针对健康老年被试进行的研究显示,与虚假刺激相比,tVNS 刺激条件下被试的联想记忆任务表现更好(Jacobs et al., 2015)。以上研究结果证实 tVNS 刺激技术通过提高迷走神经活性,从而影响被试的认知功能。

此外,认知训练同样能够提高被试的 HRV 水平。彭婉晴等(2019)考察了为期 20 天的工作记忆刷新训练对抑郁倾向大学生情绪调节能力的影响。他们将 40 名抑郁倾向的大学生被试分成两组,一组被试接受一段时间的工作记忆刷新训练,另一组作为抑郁倾向控制组,20 名健康大学生作为健康对照组。比较三组在前后测时的工作记忆刷新功能、情绪调节任务的得分以及 HRV 水平(HF - HRV)。结果表明,前测时抑郁倾向个体的 HF - HRV 值显著低于健康个体的平均水平,经过工作记忆训练后,抑郁倾向训练组在情绪调节任务中的 HF - HRV 值有显著的提高。该研究表明,工作记忆刷新训练提高

了抑郁倾向大学生的 HRV 水平和情绪调节能力。不仅如此,工作记忆刷新训练被用于考察对健康大学生被试迷走神经功能的影响,研究结果显示为期 20 天的工作记忆刷新训练使被试在工作记忆任务中的反应时减少, HF - HRV 值较干预前显著上升 (Xiu et al., 2016)。另外,在一项使用加工速度和注意力 (processing speed and attention, PS/A) 训练干预老年人认知功能的研究中,被试在经过 6 周的 PS/A 训练之后, PS/A 任务的表现和 HF - HRV 值显著提高 (Lin et al., 2020)。上述研究结果支持了认知训练对于提高个体 HRV 水平的有效性,进一步揭示了 HRV 和认知控制之间存在相互影响。

以上研究利用生物反馈训练、tVNS 技术和认知训练证实了 HRV 和认知控制之间存在相互影响。然而,目前多数研究只关注这些干预训练技术改善迷走神经调节和认知控制能力在生理和行为上的效应,并未探明相应的神经可塑性机制。未来的研究可以基于磁共振成像技术 (magnetic resonance imaging, MRI), 如功能 MRI (functional MRI, fMRI) 和结构 MRI, 以及脑连接分析方法进一步阐释隐藏在这些干预训练技术背后的神经重塑机理。

#### 4 心率变异性与认知控制的神经基础

HRV 和认知控制存在正相关关系和相互影响的作用,可能是由于二者都受到来自前额叶 - 皮层下回路的调控。为了验证这一观点,研究者使用脑成像技术,如正电子发射断层扫描 (Positron Emission Computed Tomography, PET)、fMRI 和脑电 (EEG) 探究 HRV 和认知控制的神经基础。

Gianaros 等 (2004) 利用 PET 在一系列难度增加的工作记忆任务中,获取了 93 名 (年龄在 50 - 70 岁) 被试的区域脑血流 (Regional Cerebral Blood Flow, rCBF), 并探讨了 rCBF 和 HF - HRV 的关系。研究结果显示随着任务难度的增加, HF - HRV 值降低,这说明反映迷走神经活动的 HRV 与工作记忆的难度之间存在负相关。此外, HF - HRV 与工作记忆任务诱发的内侧前额叶皮层、岛叶、前扣带、杏仁核 - 海马复合体的 rCBF 变化呈正相关,和小脑的 rCBF 变化呈负相关。同样地, Lane 等 (2009) 在一项 PET 研究中观察到工作记忆和注意维持诱发的 rCBF 与 HF - HRV 在背外侧前额叶皮层和右下额叶皮质呈正相关。另外, Jennings 等 (2015) 使用静息态的动脉自旋标记 MRI 扫描,在 440 人的大样本研究中探讨执行功能与 HF - HRV 之间是否存在相同的脑区关联。结果显示,在 7 项关于执行功能的神经心理学测试中,只有个别测试结果同时与 HF - HRV 及相关脑区有联系,即倒背数字记忆广度任务表现和 HF - HRV 与右侧内侧前额叶的 CBF 呈负相关;stroop 任务的表现和 HF - HRV 与壳核的 CBF 呈负相关。然而在区分高加索白人和非洲裔美国人后,这些结果都不显著,该研究证实认知控制与 HRV 之间的关系可能存在种族差异。上述研究结

果表明个体的认知控制任务表现和迷走神经功能可能与前额叶皮质和皮下区域脑血流的变化有关。

除脑血流外,研究者利用 fMRI 技术探讨了认知控制任务表现、HRV 水平和脑激活三者之间的关系。例如 Matthews 等 (2004) 利用 fMRI 考察了前扣带的功能分区与自主神经系统功能的关系。在 18 名健康被试中,左侧背侧前扣带 (dorsal anterior cingulate cortex, dACC) 参与抑制功能 (stroop 任务干扰效应),而 HF - HRV 与左侧腹侧前扣带的激活呈正相关 (ventral anterior cingulate cortex, vACC)。该结果支持了前扣带皮层功能分区的观点,说明前扣带的腹侧部分在副交感神经的调节中可能起着重要作用。Neumann 等 (2006) 基于 fMRI 考察了 HRV 和反应抑制的神经关联,结果显示被试在完成 Go/No-Go 任务时, HF - HRV 的值与双侧尾状核的激活呈正相关,与右侧额叶皮层的激活呈负相关。类似地, Critchley 等 (2003) 对 6 名健康被试进行的任务态 fMRI 扫描,研究结果显示被试进行工作记忆 (n-back) 任务和等长运动时, HF - HRV 和 dACC、内侧 OFC、脑岛及下丘脑的激活呈正相关。在一项使用持续操作任务 (CPT) 的 fMRI 研究中, CPT 任务引起了 RMSSD 值的降低,并且伴随着 vmPFC、ACC、额下回和岛叶等脑区的激活减弱 (Iacovella et al., 2018)。以上神经成像的研究结果显示 HRV 和认知控制的关系主要受到前额叶皮质和杏仁核等皮层下结构的调节。

另一种时间精度更高的 EEG 技术在认知控制和 HRV 神经关联的研究中却非常少见。据我们所知,目前仅有一篇外文文献报道了认知控制任务表现、HRV 水平和 EEG 指标三者之间的关系。Alba 等 (2019) 对于静息态 HRV、EEG 功能连接变异性 (electroencephalography functional connectivity variability) 和认知灵活性之间的关系进行了探讨,发现三者之间均存在显著相关。偏相关结果显示在去除 EEG 功能连接变异性的影响后, HRV 和认知灵活性之间的相关性变得不显著;回归分析也显示 EEG 功能连接变异性在最大程度上解释了认知灵活性的变异。这个结果说明 HRV 和认知灵活性之间的关系受到 EEG 功能连接变异性的调控,即 HRV 与认知灵活性的关系由二者共同的神经基础决定。由于 EEG 时间精度高、实验环境相对开放,且能够更精准地描绘大脑电生理活动随着 HRV 值和实验任务的动态变化,未来的研究可利用此种技术手段进一步探讨认知控制任务表现、迷走神经功能和大脑电生理活动三者之间的关系。

以上研究表明, HRV 与认知控制存在共同的神经基础。迷走神经功能的调节主要依靠中枢自主网络 (Central Autonomic Network, CAN) (Benarroch, 1993)。CAN 是内部调节系统的一个完整的组成部分,大脑通过这个系统控制着内脏运动、神经内分泌和行为反应,而这些反应对于目标导向行为、适应性

和健康都是非常重要的(Thayer et al., 2012)。CAN在皮层与皮层下结构之间起到相互联系与整合的作用,连接了负责自主神经功能和高级认知功能相关的脑区。CAN活动的变化可以反映HRV水平的改变。前额叶-皮层下回路是CAN的核心成分,HRV水平的变化受到该回路的调控(Sklerov et al., 2019; Thayer & Lane, 2009)。对于认知控制而言,前额叶-皮层下回路的功能同样重要,该回路的更强连通性与认知控制能力的提高相关(Miller & Cohen, 2001)。

## 5 总结与展望

为了尽可能保证研究对象和方法的同质性,本研究综述只关注了对于健康被试进行的实验室研究,HRV的测量为时域或频域指标。但是在伯格的多层迷走神经理论(Porges, 2007)下的研究多使用呼吸性窦性心律不齐(respiratory sinus arrhythmia, RSA)这一指标。然而,有研究表明RSA容易受呼吸状态和非平稳性的影响(Lewis et al., 2012)。另外,由欧洲心脏病学会和北美心脏起搏与电生理学学会制定的心电工作指南(Thayer et al., 2012)强调了时域和频域指标的应用,因此本篇综述没有纳入关于RSA的研究。当前对于HRV和认知控制的研究大多支持了神经内脏整合模型的观点,认为由迷走神经调控的HRV可以反映大脑前额叶皮层的活动特性,从而可以预测认知控制的能力。这对于提高认知能力或是预防认知能力下降具有一定的启示作用,可以试图通过定期的有氧运动、共振呼吸训练或tVNS技术来提高个体的HRV水平,从而提高或维持认知能力。

在以往的研究中,由于不同研究间的异质性较大,得出的结论并不完全统一。为了更好地阐释迷走神经功能在认知控制任务中所扮演的角色及其作用,得出更为可靠的研究结论,未来的研究可以从以下几个方面着手,进一步探讨HRV和认知控制的关系。

第一,提高HRV和认知控制的测量标准。在探讨认知控制和迷走神经功能的相关性时,以往研究对于实验中无关变量的控制存在很大偏差。首先,与HRV有关的影响因素包括测量指标和状态不统一,使用的采集仪器和对被试的要求(采集前是否有休息,采集时的姿势和状态等)不同。研究表明HRV的时域和频域指标都能够可靠的反映自主神经系统的功能(Radespiel-Troger et al., 2003),在一些研究中却显示这两类指标得到结果并不一致,其中的原因可能有:不同心电采集设备的使用,不同的变量操纵,以及不同的被试特征等。对于HRV指标的采集可以参考欧洲心脏病学会制定的工作指南,例如固定的心电图采集设备,测量静息HRV之前先让被试休息5分钟,测量的时间最好在5分钟以上等(Laborde et al., 2017)。另一方面,对于认知控制的测量,不同研究采用的研究范式不一致,其反映的认知成分也不一样,基于不同的认知成分进一

步阐释各个子成分(如认知灵活性、抑制控制和工作记忆)和HRV的相关性,有助于完善当前对认知控制和迷走神经功能关系的研究。对于被试特征,一部分研究使用了较小的样本量,人口统计学方面的影响很难消除。综上,未来的研究需要更加严谨的实验和变量操控,保证足够的样本量大小,充分报告人口统计学特征,并尽可能排除这些变量的影响,从而对HRV与认知控制两者的关系得出更稳定的结论。

第二,深入探究混淆变量对HRV和认知控制关系的调节作用。虽然有研究表明HRV与认知控制的相关性在不同种族(如:白人群体和非洲裔群体)之间存在差异,但类似的研究还很少。先前的研究主要探讨了HRV和抑制控制及工作记忆任务表现的相关性在白人和非洲裔群体之间存在差异(Jennings et al., 2015),但并未涉及种族差异对HRV与认知灵活性相关关系的影响。不仅如此,当前发表的研究大多基于欧美国家的人群,其结论难以推广到其他国家和地区,在中国更是缺少本土化的研究。另外,年龄、性别和运动习惯等因素能够影响个体的HRV水平(Forte et al., 2019; Luft et al., 2009; Stenfors et al., 2016),但少有研究探讨这些因素对HRV和认知控制相关性的影响。综上,未来的研究可以进一步考察种族、年龄、性别和运动习惯等因素对二者关系产生的影响;另外,可以利用神经影像技术来探究这些混淆因素如何对HRV和认知控制产生影响。

第三,深入研究HRV与认知控制的神经重塑机理。目前的研究大多从相关角度对HRV与认知控制的关系进行探讨,对于二者之间的相互作用的研究较少。根据Claude Bernard的心脑连接理论,心脏和大脑之间存在相互影响的,因此HRV和认知能力存在相互影响(Thayer & Lane, 2009)。现有的工作记忆刷新训练(彭婉晴等, 2019)和tVNS研究(Clancy et al., 2014; Steenbergen et al., 2015)已经支持了这一观点。但仍需要更确切的研究去探讨认知控制和HRV之间的相互作用。未来的研究可以结合认知训练和HRV干预技术(如tVNS技术或HRV生物反馈训练)探讨个体在接受干预训练前、后迷走神经功能和认知调节能力的变化,以考查干预训练的行为学效果,并追踪它的长期稳定效应。不仅如此,研究者还可以利用多模态的脑成像技术,如fMRI、结构MRI、功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)和EEG等技术,结合脑连接分析方法,进一步阐释隐藏在干预训练技术背后的神经可塑性机制。

## 参考文献

- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (Eds.). (2011). 认知神经科学:关于心智的生物学(周晓琳,高定国译). 北京:轻工业出版社.
- 彭婉晴,罗玮,周仁来.(2019). 工作记忆刷新训练改善抑郁倾向大学生情绪调节能力的HRV证据. 心理学报, 51

- (6), 648 – 661.
- Alba, G. , Vila, J. , Rey, B. , Montoya, P. , & Munoz, M. A. (2019). The relationship between heart rate variability and electroencephalography functional connectivity variability is associated with cognitive flexibility. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 64.
- Alderman, B. L. , & Olson, R. L. (2014). The relation of aerobic fitness to cognitive control and heart rate variability: A neurovisceral integration study. *Biological Psychology*, 99, 26 – 33.
- Benarroch, E. E. (1993). The central autonomic network: Functional organization, dysfunction, and perspective. *Mayo Clinic Proceedings*, 68(10), 988 – 1001.
- Clancy, J. A. , Mary, D. A. , Witte, K. K. , Greenwood, J. P. , Deuchars, S. A. , & Deuchars, J. (2014). Non – invasive vagus nerve stimulation in healthy humans reduces sympathetic nerve activity. *Brain Stimulation*, 7(6), 871 – 877.
- Colzato, L. S. , Jongkees, B. J. , de Wit, M. , van der Molen, M. J. W. , & Steenbergen, L. (2018). Variable heart rate and a flexible mind: Higher resting – state heart rate variability predicts better task – switching. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 18(4), 730 – 738.
- Colzato, L. S. , & Steenbergen, L. (2017). High vagally mediated resting – state heart rate variability is associated with superior action cascading. *Neuropsychologia*, 106, 1 – 6.
- Critchley, H. D. , Mathias, C. J. , Oliver, J. , John, O. D. , Sergio, Z. , Bonnie – Kate, D. , . . . Dolan, R. J. (2003). Human cingulate cortex and autonomic control: Converging neuroimaging and clinical evidence. *Brain*, 126(10), 2139 – 2152.
- de Bruin, E. I. , van der Zwan, J. E. , & Bogels, S. M. (2016). A RCT comparing daily mindfulness meditations, biofeedback exercises, and daily physical exercise on attention control, executive functioning, mindful awareness, self – compassion, and worrying in stressed young adults. *Mindfulness*, 7(5), 1182 – 1192.
- 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(4), 680 – 693.
- Forté, G. , Favieri, F. , & Casagrande, M. (2019). Heart rate variability and cognitive function: A systematic review. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 710.
- Gianaros, P. J. , Van Der Veen, F. M. , & Jennings, J. R. (2004). Regional cerebral blood flow correlates with heart period and high – frequency heart period variability during working – memory tasks: Implications for the cortical and subcortical regulation of cardiac autonomic activity. *Psychophysiology*, 41(4), 521 – 530.
- Hansen, A. L. , Johnsen, B. H. , Sollers III, J. J. , Stenvik, K. , & Thayer, J. F. (2004). Heart rate variability and its relation to prefrontal cognitive function: The effects of training and de-training. *European Journal of Applied Physiology*, 93(3), 263 – 272.
- Hansen, A. L. , Johnsen, B. H. , & Thayer, J. F. (2003). Vagal influence on working memory and attention. *International Journal of Psychophysiology*, 48(3), 263 – 274.
- Holzman, J. B. , & Bridgett, D. J. (2017). Heart rate variability indices as bio – markers of top – down self – regulatory mechanisms: A meta – analytic review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 74, 233 – 255.
- Iacovella, V. , Faes, L. , & Hasson, U. (2018). Task – induced deactivation in diverse brain systems correlates with interindividual differences in distinct autonomic indices. *Neuropsychologia*, 113, 29 – 42.
- Jacobs, H. I. , 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(5), 1860 – 1867.
- Jennings, J. R. , Allen, B. , Gianaros, P. J. , Thayer, J. F. , & Manuck, S. B. (2015). Focusing neurovisceral integration: Cognition, heart rate variability, and cerebral blood flow. *Psychophysiology*, 52(2), 214 – 224.
- Laborde, S. , Furley, P. , & Schempp, C. (2015). The relationship between working memory, reinvestment, and heart rate variability. *Physiology & Behavior*, 139, 430 – 436.
- Laborde, S. , Mosley, E. , & Thayer, J. F. (2017). Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research – recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. *Frontiers in Psychology*, 8, 213.
- Lane, R. D. , McRae, K. , Reiman, E. M. , Chen, K. , Ahern, G. L. , & Thayer, J. F. (2009). Neural correlates of heart rate variability during emotion. *Neuroimage*, 44(1), 213 – 222.
- Lehrer, P. , Vaschillo, B. , Zucker, T. , Graves, J. , Katsamanis, M. , Aviles, M. , & Wamboldt, F. (2013). Protocol for heart rate variability biofeedback training. *Biofeedback*, 41(3), 98 – 109.
- Lewis, G. F. , Furman, S. A. , McCool, M. F. , & Porges, S. W. (2012). Statistical strategies to quantify respiratory sinus arrhythmia: Are commonly used metrics equivalent? *Biological Psychology*, 89(2), 349 – 364.
- Lin, F. V. , Tao, Y. , Chen, Q. , Anthony, M. , Zhang, Z. , Tadin, D. , & Heffner, K. L. (2020). Processing speed and attention training modifies autonomic flexibility: A mechanistic intervention study. *Neuroimage*, 213, 116730.
- Luft, C. D. B. , Takase, E. , & Darby, D. (2009). Heart rate variability and cognitive function: Effects of physical effort. *Biological Psychology*, 82(2), 164 – 168.
- Mahinrad, S. , Jukema, J. W. , van Heemst, D. , Macfarlane, P. W. , Clark, E. N. , de Craen, A. J. , & Sabayan, B. (2016). 10 – second heart rate variability and cognitive function in old age. *Neurology*, 86(12), 1120 – 1127.
- Mather, M. , & Thayer, J. (2018). How heart rate variability affects emotion regulation brain networks. *Current Opinion in Behavioral Science*, 19, 98 – 104.
- Matthews, S. C. , Paulus, M. P. , Simmons, A. N. , Nelesen, R. A. , & Dimsdale, J. E. (2004). Functional subdivisions within anterior cingulate cortex and their relationship to autonomic nervous system function. *Neuroimage*, 22(3), 1151 – 1156.
- Miyake, A. , Friedman, N. P. , Emerson, M. J. , Witzki, A. H. , Howerter, A. , & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49 – 100.
- Miller, E. K. (2000). The prefrontal cortex and cognitive control. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(1), 59 – 65.
- Miller, E. K. , & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of

- prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167 – 202.
- Neumann, S. A. , Brown, S. M. , Ferrell, R. E. , Flory, J. D. , Manuck, S. B. , & Hariri, A. R. (2006). Human choline transporter gene variation is associated with corticolimbic reactivity and autonomic – cholinergic function. *Biological Psychiatry*, 60(10), 1155 – 1162.
- Paul, M. , & Garg, K. (2012). The effect of heart rate variability biofeedback on performance psychology of basketball players. *Applied Psychophysiology Biofeedback*, 37(2), 131 – 144.
- Porges, S. W. (2007). The polyvagal perspective. *Biological Psychology*, 74(2), 116 – 143.
- Prinsloo, G. E. , Rauch, H. G. L. , Lambert, M. I. , Muench, F. , Noakes, T. D. , & Derman, W. E. (2011). The effect of short duration heart rate variability(HRV) biofeedback on cognitive performance during laboratory induced cognitive stress. *Applied Cognitive Psychology*, 25(5), 792 – 801.
- Radespiel – Troger, M. , Rauh, R. , Mahlke, C. , Gottschalk, T. , & Muck – Weymann, M. (2003). Agreement of two different methods for measurement of heart rate variability. *Clinical Autonomic Research*, 13(2), 99 – 102.
- Saul, J. P. (1990). Beat – to – beat variations of heart rate reflect modulation of cardiac autonomic outflow. *Physiology*, 5(1), 32 – 37.
- Sklerov, M. , Dayan, E. , & Browner, N. (2019). Functional neuroimaging of the central autonomic network: Recent developments and clinical implications. *Clinical Autonomic Research*, 29(6), 555 – 566.
- 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(6), 773 – 778.
- Stenfors, C. U. , Hanson, L. M. , Theorell, T. , & Osika, W. S. (2016). Executive cognitive functioning and cardiovascular autonomic regulation in a population – based sample of working adults. *Frontiers in Psychology*, 7, 1536.
- Sutarto, A. P. , Wahab, M. N. , & Zin, N. M. (2013). Effect of biofeedback training on operator's cognitive performance. *Work*, 44(2), 231 – 243.
- Sztajzel, J. (2004). Heart rate variability: A noninvasive electrocardiographic method to measure the autonomic nervous system. *Swiss Medical Weekly*, 134(35 – 36), 514 – 522.
- Thayer, J. F. , Ahs, F. , Fredrikson, M. , Sollers III, J. J. , & Wager, T. D. (2012). A meta – analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(2), 747 – 756.
- Thayer, J. F. , Hansen, A. L. , Saus – Rose, E. , & Johnsen, B. H. (2009). Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: The neurovisceral integration perspective on self – regulation, adaptation, and health. *Annals of Behavioral Medicine*, 37(2), 141 – 153.
- Thayer, J. F. , & Lane, R. D. (2009). Claude Bernard and the heart – brain connection: Further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(2), 81 – 88.
- Verbruggen, F. , Schneider, D. W. , & Logan, G. D. (2008). How to stop and change a response: The role of goal activation in multitasking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(5), 1212 – 1228.
- Williams, D. P. , Thayer, J. F. , & Koenig, J. (2016). Resting cardiac vagal tone predicts intraindividual reaction time variability during an attention task in a sample of young and healthy adults. *Psychophysiology*, 53(12), 1843 – 1851.
- Xiu, L. , Zhou, R. , & Jiang, Y. (2016). Working memory training improves emotion regulation ability: Evidence from HRV. *Physiology & Behavior*, 155, 25 – 29.
- Zahn, D. , Adams, J. , Krohn, J. , Wenzel, M. , Mann, C. G. , Gommille, L. K. , ... Kubiak, T. (2016). Heart rate variability and self – control – A meta – analysis. *Biological Psychology*, 115, 9 – 26.

## The Relationship between Heart Rate Variability and Cognitive Control

Chen Xiuwen<sup>1</sup>, Li Fuhong<sup>2</sup>, Wei Luqing<sup>2</sup>

(1. Second People's Hospital of Huizhou, Huizhou 516000; 2. School of Psychology, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022)

**Abstract:** The neurovisceral integration model postulates that the prefrontal – subcortical neural circuit was involved in the regulation of vagally – mediated heart rate variability(HRV). The vagally – mediated HRV may predict individual's performance of cognitive control. The present paper is to summarize former researches concerning vagally – mediated HRV and cognitive control, and draw a conclusion about their correlation, mutual influences and neural basis. Three major findings were described in this review. Firstly, by summarizing the existing research, positive correlation was observed between vagally – mediated HRV and three subcomponents of cognitive control. This was in line with the neurovisceral integration model that individual differences in vagally – mediated HRV were related to performance on cognitive function tasks. Secondly, studies using techniques such as HRV biofeedback training, tVNS technique and cognitive training have shown that vagally – mediated HRV levels and cognitive performance can be improved effectively, which may help us get better understanding of the mutual influence between vagally – mediated HRV and cognitive function. Finally, convergent neuroimaging evidences show that vagally – mediated HRV and cognitive control are both regulated by the prefrontal – subcortical circuit. In the future, studies using brain imaging techniques combined with HRV biofeedback training or tVNS technique are needed to clarify the neuroplasticity mechanism. This would be helpful for further understanding of the mutual influence between vagally – mediated HRV and cognitive control.

**Key words:** neurovisceral integration model; heart rate variability; cognitive control; prefrontal – subcortical circuit