

食物决策的认知神经机制及肥胖人群运动干预建议

黄佳媛^{1,2}, 蔡雨薇¹, 黄璜¹, 何昭睿¹, 徐霞^{1,2*}

1. 武汉体育学院健康科学学院, 武汉 430079

2. 运动训练监控湖北省重点实验室, 武汉 430079

摘要 在综述食物决策的认知神经机制、运动干预与食物决策交互作用的基础上, 提出了运动改善肥胖人群食物决策的认知神经机制框架, 认为运动可能通过改善肥胖人群的执行控制网络进而改善食物决策; 回顾了不同剂量的运动影响肥胖人群食物决策的研究成果, 发现持续 20 min 以上、中至高强度的运动可能对肥胖人群的食物决策产生积极效应。

关键词 肥胖; 食物决策; 前额叶; 运动; 青少年

肥胖已成为威胁居民身心健康的重要公共卫生问题。截至 2019 年, 中国成年居民超重肥胖超过 50%, 6 岁以下和 6~17 岁的儿童青少年分别为 10.4% 和 19%^[1]。肥胖人群不仅有患糖尿病、心血管疾病和癌症等严重躯体疾病的风险, 而且有患抑郁、焦虑等精神障碍的风险^[2]。

体重增加和肥胖的主要成因之一是不健康的食物决策^[3]。食物决策决定了个体的能量摄入和膳食质量^[4]。目前, 中国居民不健康的饮食模式仍然普遍存在。在《中国居民膳食指南科学研究报告 2021》指出, 家庭烹调用油用盐摄入量高于中国营养学会推荐水平, 外出就餐和外卖点餐率上升, 含

糖饮料消费逐年上升; 全谷物、深色蔬菜、水果、奶类、鱼虾类和大豆类摄入不足, 膳食结构不合理问题突显^[5]。国务院发布的《健康中国行动(2019—2030 年)》也将“合理膳食行动”列为重大行动之一。因此, 促进健康食物决策刻不容缓。

近年来, 运动促进人类做出有利于身体健康的食物决策并坚持合理膳食已得到了研究印证, 但其潜在认知神经机制与剂量效益仍需进一步探讨。因此, 基于理论和现有的行为和脑科学研究证据, 回顾食物决策认知神经机制的理论和研究进展、运动干预剂量-反应关系, 以期更好地理解运动、食物决策和肥胖之间的关系。

收稿日期: 2022-02-17; 修回日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(81971661); “运动与脑科学”湖北高校优势特色学科群项目

作者简介: 黄佳媛, 博士研究生, 研究方向为运动心理学, 电子信箱: sherry1942@126.com; 徐霞(通信作者), 教授, 研究方向为运动心理学, 电子信箱: xuxia@whsu.edu.cn

引用格式: 黄佳媛, 蔡雨薇, 黄璜, 等. 食物决策的认知神经机制及肥胖人群运动干预建议[J]. 科技导报, 2022, 40(10): 78-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.10.008

1 食物决策认知神经机制的理论和研究进展

食物决策是指在两者或者更多食物之间做出选择并决定食物的摄入量^[3],是一个复杂的过程,涉及内部因素(例如饥饿感、自我控制)和外部因素(例如家庭饮食习惯、食品营销)之间的相互作用^[6]。研究者从认知加工的角度提出了不同的理论来阐释个体为何做出不健康的食物决策,包括自我控制的双系统理论、前额叶-皮层下脑区的平衡模型、健康神经科学模型。根据食物决策的认知加工理论及脑成像研究成果,研究者也提出了包含4个脑网络/系统的食物决策大脑环路,包括执行控制网络、食欲奖赏网络、内稳态系统和内感受系统。

1.1 食物决策的认知加工理论

1) 自我控制的双系统理论。最具代表性的理论是Hofmann等^[7]提出的自我控制的双系统理论,认为个体在做出食物决策时,冲动和自我控制同时发挥作用,当自我控制不能压制冲动时就会产生不健康的食物决策。模型包括3个部分:冲动系统、反思系统、状态或者特质调节变量。冲动系统负责产生冲动行为,而反思系统负责更高层次的心理活动,包括执行功能、为追求目标而制定战略行动计划、以及抑制或压倒优势反应。另外,状态或者特质调节变量负责转换反思系统和冲动系统对行为结果的影响。脑成像研究发现,反思系统主要依赖前额叶(prefrontal cortex, PFC)功能,包括前扣带皮层(anterior cingulate cortex, ACC)和背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC);冲动系统主要依赖于纹状体和杏仁核功能,负责对食物相关线索做出反应^[8-9]。

2) 前额叶-皮层下脑区的平衡模型。在双系统理论的基础上,Heatherton等^[10]进一步提出了前额叶-皮层下脑区的平衡模型,认为涉及自我控制的前额叶皮层自上而下调节负责奖赏与情绪加工的皮层下脑区,任何偏向皮层下脑区的平衡都可能导致自我控制失败。该理论也得到了研究验证,肥胖的特征是促进寻求奖励和控制认知致使的大脑回路失衡,由于前额叶皮层抑制控制失调,杏仁核

和岛叶信息输入异常升高,背侧尾状核促进了异常刺激-反应学习和激励动机,因此对外部食物线索的敏感性增强^[11]。另外,暴食可能与异常的前额叶、纹状体、岛叶、眶额叶皮层(orbitofrontal cortex, OFC)的回路有关^[12]。

3) 健康神经科学模型。将大脑皮层发育的观点引入食物决策理论后,Lowe等^[13]从健康神经科学的视角阐述了为什么儿童青少年容易做出不健康的食物决策。该理论认为,食物决策是伴随着大脑发育不断发展的,前额叶皮层在青春期未发育成熟,但奖赏系统已发育成熟,造成了自上而下的认知调节和奖赏驱动行为之间的不平衡^[14],这种不平衡会导致行为控制减弱而奖赏敏感性增加^[15-16],自我控制减弱而做出失败的食物决策,进而导致肥胖,而肥胖又会危害发育中的大脑。研究表明,奖赏敏感性在儿童和青春期之间增加,在青春期后期(18~21岁)达到顶峰然后下降,认知控制在整个青春期逐渐线性增加至20岁左右,同时奖赏敏感性的增强和仍在发展中的认知控制相冲突,使得青春期的中后期更容易做出冲动行为^[17]。

综上,这3个理论均强调了依赖于前额叶功能的自我控制在食物决策中的重要作用^[18-19],当个体的自我控制不足以调制食物奖赏冲动时,就会做出不健康的食物决策。并且,由于自我控制在青春期还未发展完善,自我控制并不能有效地延迟奖赏满足,从而导致个体的食物决策需要满足对高热量、美味食物的即时需求,故不健康食物决策在这一时期可能会增加。

1.2 食物决策的全脑环路

1) 执行控制网络。执行控制网络依赖于相互连接的前额叶区域功能^[20-21],包括ACC、DLPFC、额下回、后顶叶皮层,负责自上而下的认知控制、下达任务指令、监控冲突和行为后果。例如,前额叶皮层能够抑制对短期奖赏的渴望而驱使个体获得长期奖赏^[22],因此在自我控制发挥重要作用。另外,当个体试图控制与食物相关的反应时,ACC和DLPFC被激活^[9]。

2) 食欲奖赏网络。食欲奖赏网络包括纹状体^[23]、腹内侧前额叶皮层(ventromedial prefrontal

cortex, vmPFC)^[24]和OFC^[25],主要负责编码食物线索的主观价值、特定奖赏贬值刷新。例如,当个体做出健康的食物决策时,vmPFC的激活会随着所选择食物的健康估值升高而增加,在健康决策过程中,当需要自我控制时,vmPFC的激活由DLPFC调节^[26]。

3) 内稳态系统。内稳态系统以下丘脑为核心^[21],参与将食物奖赏信息、内感觉信息的编码及自我调控的决策传递到大脑等过程。下丘脑通过下丘脑核和相关神经肽传递神经通路信号,与脑干和外周信号相互作用,从而调节食物摄入和能量平衡,最终达到控制体重的目的^[27]。

4) 内感受系统。内感受系统以岛叶为核心,负责将内感受的、躯体的信号整合和翻译成预期、欲望或渴望等主观体验,调节执行控制网络和食欲奖赏网络之间的平衡^[18-9,28]。例如,岛叶激活的增加与自我报告的饥饿和对食物的渴望显著相关^[29];岛叶触发的变化改变了冲动系统和反射系统之间的动态神经平衡,这种由脑岛引起的神经动力学的调节在身体质量指数(BMI)较高的个体和吃更多高热量食物的个体中更大^[9]。

综上,执行控制网络的DLPFC和额下回负责下行调节纹状体、vmPFC、OFC等食欲奖赏网络,并能预测随后减少的食物摄入量^[30-34]。行为学研究表明,自控能力差可能会对肥胖人群的食物决策产生不利影响;神经成像研究表明,肥胖人群的大脑中与奖赏、自我控制和内感受相关的区域对食物的神经反应发生了改变^[3]。与食物决策大脑环路对应的是,与健康人群相比,肥胖人群大脑中与认知控制(DLPFC)相关的脑区的激活减少^[35],表明行为控制减弱;而与食物奖赏和热量评估(纹状体和杏仁核等)相关的脑区激活增加^[36],表明奖赏敏感性增加;这提示肥胖人群容易做出不健康的食物决策可能是因为其异常的食物决策大脑环路导致的。

2 运动干预与食物决策的关系

运动干预是指通过各种运动训练方案的实施,

以促进体适能和健康为目的的有计划的、结构化的、重复性的身体活动^[37]。身体活动则泛指任何类型的运动,也包括做家务等由于骨骼肌收缩产生的机体能量消耗增加的活动。运动干预(增加能量消耗)与合理膳食(减少能量摄入)是体重控制的两大基石。然而,运动在明显增加能量消耗的同时,也对能量摄入产生作用,运动对体脂的最终影响将取决于能量消耗和能量摄入之间的平衡,以及运动产生负能量平衡(能量消耗大于能量摄入)的能力。运动与能量消耗、食欲控制的关系也会受到许多调节因素(生理、心理和环境)的影响。尽管现有理论和相应研究成果表明运动可以调节食欲和食物摄入,如身体活动影响饮食行为的概念模型、运动动机影响食物/饮料消耗的心理模型,但人们对运动如何影响食物决策及其认知神经机制仍知之甚少。因此,结合运动干预对执行控制网络影响的研究进展,提出运动影响肥胖人群食物决策的认知神经机制框架,以期对体重控制领域的基础研究和应用研究提供参考。

2.1 身体活动水平与能量消耗/食欲控制的关系

Beaulieu等^[38]使用了10项横断研究的数据绘制了身体活动水平与能量消耗之间的J型曲线关系,即低身体活动水平的个体能量摄入大于消耗;而那些高身体活动水平的个体的摄入会随着消耗的增加而成比例的增加。在此基础上,Beaulieu等^[39-40]提出身体活动影响饮食行为的概念模型,认为低水平的身体活动与较弱的饱腹感信号、高美味(liking)/高渴望(wanting)的高脂肪/高能量的饮食有关,在食欲控制的非调节区内,对食物环境的享乐输入有更大的反应性,从而导致过度进食和体脂增加。高水平的身体活动与食欲控制可调节区内的饱腹感信号增强、高美味的低脂/低能量食物及低渴望的高脂肪饮食有关,从而使能量摄入和消耗之间更好地匹配。随着规律性身体活动水平(例如定期进行中高强度的运动)的提高、体重减轻和食欲控制改善,美味的程度会稍微增加,渴望的程度会稍微减少。Julian等^[41]回顾了以往研究发现,低身体活动水平/高久坐行为水平与儿童青少年的食

物摄入量增加和不良饮食质量之间存在关联。

2.2 运动动机对食物/饮料消耗的影响

运动的生理因素(如运动强度等剂量参数)已被证明会影响食物/饮料消耗^[42-43]。在此基础上, Beer等^[44]提出运动动机影响食物/饮料消耗的心理模型,即运动的生理因素和心理因素(运动动机)的交互作用可能影响运动后饮食行为。根据自我决定理论,个体由于非常认可运动的有益结果、运动与自身价值观和身份一致、享受运动的过程等原因而运动,则被认为具有自主运动动机。然而,个体为了获得外部强加的奖赏或避免外部强加的惩罚,或由于内部压力如避免内疚或焦虑的感觉而运动,则被认为具有受控运动动机。运动动机可能通过反思认知过程、冲动认知过程、生理反应等途径影响运动后饮食行为^[45]。关于反思认知过程,具有受控运动动机的锻炼者更有可能在运动后激活补偿健康信念^[46],诱发不健康或过量的食物/饮料消耗。关于冲动认知过程,由受控动机控制的运动需要消耗自我控制资源来完成,它的消耗降低了具有受控运动动机的个体在随后进行饮食自我控制的能力,做出不健康的食物决策。最后,运动动机可能通过对食欲有直接或间接影响的生理信号(如皮质醇、胃饥饿素等)来调节运动后的饮食行为。

2.3 运动干预对执行控制网络的影响

尽管尚不完全清楚运动如何调节大脑的食物决策功能,但根据以往研究发现,肥胖通常与执行控制网络的连接减弱有关^[47],认知训练和神经刺激干预通过对DLPFC激活来促进肥胖人群的执行功能,减少不健康饮食^[48],短时运动提高的执行功能可能会转移到饮食自我控制上^[49-50];基于执行控制网络的核心地位(自上而下调节其他系统功能),因此,运动干预对执行控制网络的积极影响可能是运动改善食物决策的主要机制之一。

从行为学研究来看,运动干预对执行功能的积极效应已被大量研究证明。虽然研究者的纳入标准不同,但是现有元分析研究均揭示了短时运动^[51-55]和长期运动^[53, 56-57]对执行功能的积极效应;从运动强度来看,中等强度^[54]、高等强度^[55]或高强度间歇运动^[51]均有积极效应;从年龄来看,儿童青少

年^[53, 56-57]或全年龄段^[51-52, 54-55],特别是肥胖青少年^[58],均是受益群体。

从脑功能研究来看,运动干预可能会有效地改善执行控制网络。短时运动可以积极影响儿童青少年和成年人执行功能任务相关的神经电活动^[59-60],增强抑制控制、促进前额叶皮层激活^[61],能帮助DLPFC功能从暂时的神经刺激抑制中恢复^[62],并且对额顶功能连接有积极影响^[63]。另外,太极拳训练后,主要是在前额叶皮层的解剖和功能发生了变化^[64]。运动可以改善的正常老化和轻度认知障碍的大脑网络中,额叶执行网络、额顶网络可能是运动干预效率评估中最有价值的指标之一,运动可以有效地修复这些脑网络的功能^[65]。这些证据提示,运动干预可能会通过促进肥胖人群的执行控制网络功能,提高其自我控制能力,进而做出更健康的食物决策。

2.4 运动改善肥胖人群食物决策的认知神经机制框架

目前,运动影响能量消耗/食欲控制的理论及相应的研究证据有限,尚未考虑其他个体差异或环境因素对运动干预与食物决策间关系的影响,也没有着重于运动干预是如何影响大脑从而改变食物决策的。因此,综合提出一个运动改善肥胖人群食物决策的认知神经机制框架,以期更好地理解运动、食物决策和肥胖之间的关系,并为体重控制领域提供实证和实践思路(图1)。具体而言,执行控制网络受损而食欲奖赏网络过度激活会导致食欲控制减弱,从而引发不健康的饮食行为,进而诱发体重增加甚至肥胖,增加了前额叶功能障碍和神经/精神疾病风险,反而又会进一步损害食物决策的大脑环路,造成恶性循环。这一过程不仅受到致肥环境的影响,也受到个体的健康生活方式,例如运动的影响。短时运动通过促进执行控制网络激活、削弱食欲奖赏网络的激活从而改善肥胖人群的食物决策,长期运动通过调节食物决策大脑环路4个系统的平衡以及改善身体成分从而促进肥胖人群的食物决策。而运动对食物决策的影响也会受到运动相关的生理因素和心理因素及其他个体差异变量的调节。运动对肥胖的影响可能取决于能

在长期运动的研究中,中等强度运动^[73-74]、中高强度运动^[75]和高强度运动^[76]对减少能量摄入均有积极效应。有研究发现,中等强度间歇运动和高等强度间歇运动均降低了超重肥胖成年人的食欲,对高脂肪非甜食食物的偏好在中等强度间歇运动后增加,在高等强度间歇运动后下降^[82]。另有研究发现,不论是中等强度运动干预还是高强度间歇运动干预,对肥胖成年人食欲的影响无显著差异^[78]。

3.3 运动持续时间对肥胖人群食物决策的影响

运动持续时间是指一次运动的时长。目前,一次运动的持续时间主要集中在 20~45 min 之间^[67-71]。研究发现,短时有氧运动持续 20 min 以上可对认知功能产生正向作用,最佳效益一般发生在锻炼后的 11~20 min,效益可持续至锻炼后 52 min^[83]。但是,目前缺乏对不同运动持续时间对肥胖人群食物决策影响的剂量效应研究,以及短时运动效应维持时间的研究。

3.4 运动类型对肥胖人群食物决策影响的研究进展

短时运动干预方式主要集中在骑车或跑步上,只有个别研究考察了其他运动项目(跳绳)对饮食控制的影响^[67]。长期干预通常是各种有氧运动项目的搭配,但也有研究发现 24 周不同类型运动干预(力量、耐力、力量+耐力、基于指南的身体活动)对营养素的选择或能量摄入的无显著差异^[84]。未来可以考察其他运动项目或综合运动干预对肥胖人群食物决策的影响。

3.5 运动时辰对肥胖人群食物决策的影响

近期研究开始探索运动时辰(即个体在一天中的什么时候运动)对饮食行为的影响。在早/中/晚或是在餐前/后运动,可能会通过影响能量消耗和能量摄入来增强能量平衡。Fillon 等^[85]概述了运动时辰对食欲控制和能量摄入的影响,尽管实证证据有限(主要来自肥胖青少年的研究),但建议在制定运动干预方案时考虑运动时辰;早晨运动,特别是在临近午餐时运动,不会导致随后的补偿性进食,可能会对整体能量平衡产生更好的影响。Fillon 等^[86]的实验发现,当午餐固定在中午 12:30 时,与午餐前 180 min 运动组相比,午餐前 60 min 运动组的

肥胖青少年的午餐脂肪摄入量以及对高脂肪食物的喜好更低。另一项研究发现,与控制组相比,午餐前/后运动均减少了肥胖青少年对甜食的渴望以及脂肪的喜好^[87]。这提示,安排运动时辰可以优化能量平衡和控制食欲,但也需要实证和实践来找到不同运动强度、运动持续时间、运动类型之间的最佳组合,以增强积极效果。

3.6 个体差异对运动干预和食物决策间关系的调节作用

目前,实证研究对象主要集中在肥胖儿童青少年和成年人,可能是因为这段时期是肥胖和饮食失调始发期和发展期^[88],理解这段时期食物决策和大脑功能之间的联系对于制定有效的干预策略和减少与肥胖相关的长期保健成本至关重要。另一方面,肥胖与功能衰老的交互作用可能更为复杂,骨骼肌减少和肥胖都对老年人构成健康风险,单纯地减少能量摄入不一定对其健康有益,对肥胖老年人的运动干预更需要考虑如何达到能量平衡以及促进健康的食物决策。

另外,适合健康人群食物决策的运动干预不一定适合肥胖人群。例如,肥胖人群的步行和跑步等负重活动可能会受到限制,可能无法与同龄人走或跑相同的距离。即使在肥胖人群中,对于不同剂量的运动,在偏好上也可能存在个体差异,可能随着他们的健康状况改善、体重减轻、运动行为开始变得更加规律而改变^[89];因此,在选择适合肥胖人群的运动干预时,运动的生理、心理和环境因素都需要被考虑进去,而且可能需要随着干预进程适当修订,以达到更好的食物决策干预效果。这些问题都有待未来更多的研究验证,需要建立个性化运动干预方案。

4 结论

目前,运动影响肥胖人群食物决策的研究仍处于探索和初步验证阶段。在综述食物决策的认知神经机制、运动干预与食物决策交互作用的基础上,提出了运动改善肥胖人群食物决策的认知神经机制框架,为体重控制研究与应用领域提供理论和

实践借鉴。在运动干预影响肥胖人群食物决策的剂量-反应关系分析中:(1) 短时运动通常对肥胖人群的食物决策具有积极效应,长期运动的积极效应尚不明确;(2) 中至高强度的运动可能具有积极效应;(3) 单次运动的持续时间主要集中在20~45 min之间,持续20 min以上可能产生积极效应;(4) 运动类型主要集中在骑车或跑步上,也有部分采用综合运动干预的方式;(5) 早晨越接近午餐时间的运动所产生的积极效益可能更大。总体而言,运动的剂量效应还有待进一步考察,推广这些结果时应谨慎。

现有研究为运动干预与食物决策之间的关系提供了依据,迄今为止的研究通常是考察运动对肥胖人群能量消耗/食欲控制的影响,较为缺乏运动影响食物决策的直接证据,这无疑会阻碍人们对运动与饮食行为之间的关系的认识和发展。前文综述了3个食物决策的认知加工理论,用以解释个体做出不健康的食物决策的原因。在运动干预促进执行控制网络功能研究成果的基础上,将这些理论的观点引入运动改善肥胖人群食物决策的认知神经机制框架,可以帮助解释运动对随后食物决策脑功能的影响。食物决策和运动之间的关系带来了许多潜在的研究问题,这些问题可以纳入到该领域未来的工作中,包括但不限于以下内容:(1) 中至高强度的运动可以改善运动后的食物决策,然而这种改善是否也会导致长期饮食模式的改善;(2) 与健康人群相比,肥胖人群大脑中与食物决策相关的区域功能发生了改变,这种食物决策的基线水平是否会影响后续运动对食物决策的效果;(3) 运动剂量与健康食物决策之间的关系是线性的,还是存在最佳的运动剂量。

总之,未来需要在更好地理解运动相关的生理和心理因素与食物决策的交互作用的基础上,考虑肥胖程度、年龄、性别、是否伴有其他慢性病等个体差异,进一步考察哪些运动剂量参数对食物决策的整体调节和能量平衡产生最佳效果及其认知神经机制;个性化的运动干预方案对食物决策的积极效应仍有待更多的研究验证,可能需要一种更一致和标准化的方法促进实证研究。

参考文献 (References)

- [1] Pan X F, Wang L, Pan A. Epidemiology and determinants of obesity in China[J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2021, 9(6): 373-392.
- [2] Kivimaki M, Lawlor D A, Singh-Manoux A, et al. Common mental disorder and obesity: Insight from four repeat measures over 19 years: Prospective Whitehall II cohort study[J]. *British Medical Journal*, 2009, 339: b3765.
- [3] van Meer F, Charbonnier L, Smeets P A. Food decision-making: Effects of weight status and age[J]. *Current Diabetes Reports*, 2016, 16(9): 84.
- [4] van Meer F, van der Laan L N, Eiben G, et al. Development and body mass inversely affect children's brain activation in dorsolateral prefrontal cortex during food choice [J]. *Neuroimage*, 2019, 201: 116016.
- [5] 中国营养学会. 《中国居民膳食指南科学研究报告(2021)》简本[J]. *营养学报*, 2021, 43(2): M0002.
- [6] Ha O R, Lim S L, Bruce A S, et al. Editorial: Eating behavior and food decision making in children and adolescents[J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12: 818078.
- [7] Hofmann W, Friese M, Strack F. Impulse and self-control from a dual-systems perspective[J]. *Perspectives on Psychological Science*, 2009, 4(2): 162-176.
- [8] Chen R, Li D P, Turel O, et al. Decision making deficits in relation to food cues influence obesity: A triadic neural model of problematic eating[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2018(9): 264.
- [9] He Q, Huang X, Zhang S, et al. Dynamic causal modeling of insular, striatal, and prefrontal cortex activities during a food-specific Go/Nogo task[J]. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 2019, 4(12): 1080-1089.
- [10] Heatherton T F, Wagner D D. Cognitive neuroscience of self-regulation failure[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2011, 15(3): 132-139.
- [11] Nummenmaa L, Hirvonen J, Hannukainen J C, et al. Dorsal striatum and its limbic connectivity mediate abnormal anticipatory reward processing in obesity[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31089.
- [12] Kessler R M, Hutson P H, Herman B K, et al. The neurobiological basis of binge-eating disorder[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2016, 63: 223-238.
- [13] Lowe C J, Morton J B, Reichelt A C. Adolescent obesity and dietary decision making—a brain-health perspective [J]. *Lancet Child & Adolescent Health*, 2020, 4(5): 388-

- 396.
- [14] Casey B J, Getz S, Galvan A. The adolescent brain[J]. *Developmental Review*, 2008, 28(1): 62–77.
- [15] Peeters M, Oldehinkel T, Vollebbergh W. Behavioral control and reward sensitivity in adolescents' risk taking behavior: A longitudinal trails study[J]. *Frontiers in Psychology*, 2017, 8: 231.
- [16] Van Leijenhorst L, Gunther Moor B, Op de Macks Z A, et al. Adolescent risky decision-making: Neurocognitive development of reward and control regions[J]. *Neuroimage*, 2010, 51(1): 345–355.
- [17] Shulman E P, Smith A R, Silva K, et al. The dual systems model: Review, reappraisal, and reaffirmation[J]. *The dual systems model: Review, reappraisal, and reaffirmation*, 2016, 17: 103–117.
- [18] Gettens K M, Gorin A A. Executive function in weight loss and weight loss maintenance: A conceptual review and novel neuropsychological model of weight control[J]. *Journal of Behavioral Medicine*, 2017, 40(5): 687–701.
- [19] Stoeckel L E, Birch L L, Heatherton T, et al. Psychological and neural contributions to appetite self-regulation [J]. *Obesity*, 2017, 25(Suppl 1): 17–25.
- [20] Janet R, Fournel A, Fouillen M, et al. Cognitive and hormonal regulation of appetite for food presented in the olfactory and visual modalities[J]. *Neuroimage*, 2021, 230: 117811.
- [21] Neseliler S, Hu W, Larcher K, et al. Neurocognitive and hormonal correlates of voluntary weight loss in humans [J]. *Cell Metabolism*, 2019, 29(1): 39–49.
- [22] Watanabe J, Sugiura M, Sato K, et al. The human prefrontal and parietal association cortices are involved in Nogo performances: An event-related fMRI study[J]. *Neuroimage*, 2002, 17(3): 1207–1216.
- [23] Contreras-Rodriguez O, Martin-Perez C, Vilar-Lopez R, et al. Ventral and dorsal striatum networks in obesity: Link to food craving and weight gain[J]. *Biological Psychiatry*, 2017, 81(9): 789–796.
- [24] Christensen E L, Harding I H, Voigt K, et al. Neural underpinnings of food choice and consumption in obesity [J]. *International Journal of Obesity*, 2022, 46(1): 194–201.
- [25] Simon J J, Skunde M, Wu M, et al. Neural dissociation of food- and money-related reward processing using an abstract incentive delay task[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2015, 10(8): 1113–1120.
- [26] Hare T A, Camerer C F, Rangel A. Self-control in decision-making involves modulation of the vmPFC valuation system[J]. *Science*, 2009, 324(5927): 646–648.
- [27] Wang L, Yu C C, Li J, et al. Mechanism of action of acupuncture in obesity: A perspective from the hypothalamus[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2021, 12: 632324.
- [28] Stice E, Burger K S, Yokum S. Relative ability of fat and sugar tastes to activate reward, gustatory, and somatosensory regions[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2013, 98(6): 1377–1384.
- [29] Pelchat M L, Johnson A, Chan R, et al. Images of desire: Food-craving activation during fMRI[J]. *Neuroimage*, 2004, 23(4): 1486–1493.
- [30] Hare T A, Malmaud J, Rangel A. Focusing attention on the health aspects of foods changes value signals in vmPFC and improves dietary choice[J]. *Journal of Neuroscience*, 2011, 31(30): 11077–11087.
- [31] Hollmann M, Hellrung L, Pleger B, et al. Neural correlates of the volitional regulation of the desire for food[J]. *International Journal of Obesity*, 2012, 36(5): 648–655.
- [32] Litt A, Plassmann H, Shiv B, et al. Dissociating valuation and saliency signals during decision-making[J]. *Cerebral Cortex*, 2011, 21(1): 95–102.
- [33] Lopez R B, Chen P A, Huckins J F, et al. A balance of activity in brain control and reward systems predicts self-regulatory outcomes[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2017, 12(5): 832–838.
- [34] Suzuki S, Cross L, O'Doherty J P. Elucidating the underlying components of food valuation in the human orbitofrontal cortex[J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(12): 1780–1786.
- [35] Brooks S J, Cedernaes J, Schiøth H B. Increased prefrontal and parahippocampal activation with reduced dorso-lateral prefrontal and insular cortex activation to food images in obesity: A meta-analysis of fMRI studies[J]. *PLoS One*, 2013, 8(4): e60393.
- [36] Kennedy J, Dimitropoulos A. Influence of feeding state on neurofunctional differences between individuals who are obese and normal weight: A meta-analysis of neuroimaging studies[J]. *Appetite*, 2014, 75: 103–119.
- [37] Izquierdo M, Merchant R A, Morley J E, et al. International exercise recommendations in older adults (ICF-SR): Expert consensus guidelines[J]. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 2021, 25(7): 824–853.
- [38] Beaulieu K, Hopkins M, Blundell J, et al. Does Habitual physical activity increase the sensitivity of the appetite control system? A systematic review[J]. *Sports Medicine*,

- 2016, 46(12): 1897–1919.
- [39] Beaulieu K, Hopkins M, Blundell J, et al. Homeostatic and non-homeostatic appetite control along the spectrum of physical activity levels: An updated perspective [J]. *Physiology & Behavior*, 2018, 192: 23–29.
- [40] Beaulieu K, Oustric P, Finlayson G. The Impact of physical activity on food reward: Review and conceptual synthesis of evidence from observational, acute, and chronic exercise training studies[J]. *Current Obesity Reports*, 2020, 9(2): 63–80.
- [41] Julian V, Haschke F, Fearnbach N, et al. Effects of movement behaviors on overall health and appetite control: Current evidence and perspectives in children and adolescents[J]. *Current Obesity Reports*, 2022, doi: 10.1007/s13679-021-00467-5.
- [42] Dorling J, Broom D R, Burns S F, et al. Acute and chronic effects of exercise on appetite, energy intake, and appetite-related hormones: The modulating effect of adiposity, sex, and habitual physical activity[J]. *Nutrients*, 2018, doi: 10.3390/nu10091140.
- [43] Horner K M, Schubert M M, Desbrow B, et al. Acute exercise and gastric emptying: A meta-analysis and implications for appetite control[J]. *Sports Medicine*, 2015, 45 (5): 659–678.
- [44] Beer N J, Dimmock J A, Jackson B, et al. Exercise-related factors that influence post-exercise energy intake: A psychological perspective[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2020, 23(11): 1068–1073.
- [45] Dimmock J A, Guelfi K J, West J S, et al. Does motivation for exercise influence post-exercise snacking behavior?[J]. *Nutrients*, 2015, 7(6): 4804–4816.
- [46] West J, Guelfi K J, Dimmock J A, et al. “I deserve a treat”: Exercise motivation as a predictor of post-exercise dietary licensing beliefs and implicit associations toward unhealthy snacks[J]. *Psychology of Sport and Exercise*, 2017, 32: 93–101.
- [47] Donofry S D, Stillman C M, Erickson K I. A review of the relationship between eating behavior, obesity and functional brain network organization[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2020, 15(10): 1157–1181.
- [48] Forcano L, Mata F, de la Torre R, et al. Cognitive and neuromodulation strategies for unhealthy eating and obesity: Systematic review and discussion of neurocognitive mechanisms[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2018, 87: 161–191.
- [49] Lowe C J, Hall P A, Vincent C M, et al. The effects of acute aerobic activity on cognition and cross-domain transfer to eating behavior[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8: 267.
- [50] Lowe C J, Kolev D, Hall P A. An exploration of exercise-induced cognitive enhancement and transfer effects to dietary self-control[J]. *Brain and Cognition*, 2016, 110: 102–111.
- [51] Ai J Y, Chen F T, Hsieh S S, et al. The effect of acute high-intensity interval training on executive function: A systematic review[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18: 3593.
- [52] Ishihara T, Drollette E S, Ludyga S, et al. The effects of acute aerobic exercise on executive function: A systematic review and meta-analysis of individual participant data[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2021, 128: 258–269.
- [53] Li J W, O’Connor H, O’Dwyer N, et al. The effect of acute and chronic exercise on cognitive function and academic performance in adolescents: A systematic review [J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2017, 20 (9): 841–848.
- [54] Ludyga S, Gerber M, Brand S, et al. Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A meta-analysis[J]. *Psychophysiology*, 2016, 53(11): 1611–1626.
- [55] Moreau D, Chou E. The acute effect of high-intensity exercise on executive function: A meta-analysis[J]. *Perspectives on Psychological Science*, 2019, 14(5): 734–764.
- [56] Alvarez-Bueno C, Pesce C, Cavero-Redondo I, et al. The effect of physical activity interventions on children’s cognition and metacognition: A systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 2017, 56(9): 729–738.
- [57] Bustamante E E, Williams C F, Davis C L. Physical activity interventions for neurocognitive and academic performance in overweight and obese youth: A systematic review[J]. *Pediatric Clinics of North America*, 2016, 63 (3): 459–480.
- [58] Sun X, Li Y, Cai L, et al. Effects of physical activity interventions on cognitive performance of overweight or obese children and adolescents: A systematic review and meta-analysis[J]. *Pediatric Research*, 2021, 89(1): 46–53.
- [59] Chu C H, Kramer A F, Song T F, et al. Acute exercise and neurocognitive development in preadolescents and

- young adults: An ERP study[J]. *Neural Plasticity*, 2017, 2017: 2631909.
- [60] Wu C H, Karageorghis C I, Wang C C, et al. Effects of acute aerobic and resistance exercise on executive function: An ERP study[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2019, 22(12): 1367–1372.
- [61] Levin O, Netz Y, Ziv G. Behavioral and neurophysiological aspects of inhibition—the effects of acute cardiovascular exercise[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 10(2): 282.
- [62] Lowe C J, Staines W R, Hall P A. Effects of moderate exercise on cortical resilience: A transcranial magnetic stimulation study targeting the dorsolateral prefrontal cortex[J]. *Psychosomatic Medicine*, 2017, 79(2): 143–152.
- [63] Voss M W, Weng T B, Narayana-Kumanan K, et al. Acute exercise effects predict training change in cognition and connectivity[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2020, 52(1): 131–140.
- [64] Yao Y, Ge L, Yu Q, et al. The effect of Tai Chi Chuan on emotional health: Potential mechanisms and prefrontal cortex hypothesis[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 2021: 5549006.
- [65] Huang P, Fang R, Li B Y, et al. Exercise-related changes of networks in aging and mild cognitive impairment brain[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience* 2016, 8: 47.
- [66] Dietrich A, Audiffren M. The reticular-activating hypothalamus (RAH) model of acute exercise[J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2011, 35(6): 1305–1325.
- [67] Zhang L, Chu C H, Liu J H, et al. Acute coordinative exercise ameliorates general and food-cue related cognitive function in obese adolescents[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2020, 38(8): 953–960.
- [68] Fearnbach S N, Silvert L, Keller K L, et al. Reduced neural response to food cues following exercise is accompanied by decreased energy intake in obese adolescents [J]. *International Journal of Obesity*, 2016, 40(1): 77–83.
- [69] Fearnbach S N, Silvert L, Pereira B, et al. Reduced neural responses to food cues might contribute to the anorexigenic effect of acute exercise observed in obese but not lean adolescents[J]. *Nutrition Research*, 2017, 44: 76–84.
- [70] Miguet M, Fillon A, Khammassi M, et al. Appetite, energy intake and food reward responses to an acute high intensity interval exercise in adolescents with obesity[J]. *Physiology & Behavior*, 2018, 195: 90–97.
- [71] 黄佳媛, 陈艳霞, 段炼, 等. 短时中等强度有氧运动改善成年早期肥胖者食物决策的功能性近红外成像研究[J]. *中国体育科技*, 2020, 56(11): 55–64.
- [72] Schwartz C, King N A, Perreira B, et al. A systematic review and meta-analysis of energy and macronutrient intake responses to physical activity interventions in children and adolescents with obesity[J]. *Pediatric Obesity* 2017, 12(3): 179–194.
- [73] Beaulieu K, Hopkins M, Gibbons C, et al. Exercise training reduces reward for high-fat food in adults with overweight/obesity[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2020, 52(4): 900–908.
- [74] Bhutani S, Klempel M C, Kroeger C M, et al. Effect of exercising while fasting on eating behaviors and food intake[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2013, 10(1): 50.
- [75] Bales C W, Hawk V H, Granville E O, et al. Aerobic and resistance training effects on energy intake: The STRRIDE-AT/RT study[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2012, 44(10): 2033–2039.
- [76] Quist J S, Blond M B, Gram A S, et al. Effects of active commuting and leisure-time exercise on appetite in individuals with overweight and obesity[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2019, 126(4): 941–951.
- [77] Thivel D, Finlayson G, Blundell J E. Homeostatic and neurocognitive control of energy intake in response to exercise in pediatric obesity: A psychological framework [J]. *Obesity Reviews*, 2019, 20(2): 316–324.
- [78] Martins C, Aschehoug I, Ludviksen M, et al. High-intensity interval training, appetite, and reward value of food in the obese[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2017, 49(9): 1851–1858.
- [79] Beaulieu K, Blundell J E, van Baak M A, et al. Effect of exercise training interventions on energy intake and appetite control in adults with overweight or obesity: A systematic review and meta-analysis[J]. *Obesity Reviews*, 2021, 22(Suppl 4): e13251.
- [80] Thivel D, Rumbold P L, King N A, et al. Acute post-exercise energy and macronutrient intake in lean and obese youth: A systematic review and meta-analysis[J]. *International Journal of Obesity*, 2016, 40(10): 1469–1479.
- [81] Martins C, Stensvold D, Finlayson G, et al. Effect of moderate- and high-intensity acute exercise on appetite in obese individuals[J]. *Medicine & Science in Sports &*

- Exercise, 2015, 47(1): 40–48.
- [82] Alkahtani S A, Byrne N M, Hills A P, et al. Interval training intensity affects energy intake compensation in obese men[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2014, 24(6): 595–604.
- [83] Chang Y K, Labban J D, Gapin J I, et al. The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis[J]. *Brain Research*, 2012, 1453: 87–101.
- [84] Castro E A, Carraca E V, Cupeiro R, et al. The effects of the type of exercise and physical activity on eating behavior and body composition in overweight and obese subjects[J]. *Nutrients*, 2020, 12(2): 557.
- [85] Fillon A, Mathieu M E, Boirie Y, et al. Appetite control and exercise: Does the timing of exercise play a role?[J]. *Physiology & Behavior*, 2020, 218: 112733.
- [86] Fillon A, Mathieu M E, Masurier J, et al. Effect of exercise-meal timing on energy intake, appetite and food reward in adolescents with obesity: The TIMEX study[J]. *Appetite*, 2020, 146: 104506.
- [87] Fillon A, Beaulieu K, Miguet M, et al. Does exercising before or after a meal affect energy balance in adolescents with obesity?[J]. *Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases*, 2020, 30(7): 1196–1200.
- [88] Kessler R C, Berglund P A, Chiu W T, et al. The prevalence and correlates of binge eating disorder in the World Health Organization World Mental Health Surveys [J]. *Biological Psychiatry*, 2013, 73(9): 904–914.
- [89] Edwards M K, Addoh O, Herod S M, et al. A Conceptual neurocognitive affect-related model for the promotion of exercise among obese adults[J]. *Current Obesity Reports*, 2017, 6(1): 86–92.

Cognitive neural mechanism of food decision-making and exercise interventions for obese individuals

HUANG Jiaai^{1,2}, CAI Yuwei¹, HUANG Huang¹, HE Zhaorui¹, XU Xia^{1,2*}

1. College of Health Science, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China

2. Hubei Key Laboratory of Sport Training and Monitoring, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China

Abstract The interaction between the exercise and the eating behavior is a hot research topic in the weight control of the obese individuals. This paper reviews the representative theories and studies of the food decision-making neural mechanisms, as well as the recent studies and theories of the interaction between the exercise and the food decision-making. Based on the above theories and research results, we propose a cognitive neural framework of improving the food decision-making by exercise for the obese individuals. This paper also reviews the representative studies, focusing on the effects of different doses of exercise interventions on the food decision-making for the obese individuals and provides a theoretical and practical reference for the weight control.

Keywords obesity; food decision-making; prefrontal cortex; exercise; adolescents ●



(责任编辑 卫夏雯)