



单位代码 10635

学 号 112021306000376

西南大學

硕士学位论文

超重肥胖者食物习惯化反应的行为 和 ERP 研究

论文作者：姜彦

指导教师：陈红教授

学科专业：基础心理学

研究方向：人格心理学

提交论文日期：2024 年 4 月 8 日

论文答辩日期：2024 年 5 月 16 日

学位授予单位：西南大学

中国 • 重庆

2024 年 5 月

目 录

1 文献综述.....	1
1.1 超重与肥胖的现状 & 危害	1
1.2 双系统理论.....	1
1.2.1 目标导向和习惯控制系统的测量方式	2
1.2.2 目标导向和习惯控制系统的神经电生理基础	4
1.3 超重肥胖与双系统.....	5
1.3.1 超重肥胖者习惯化反应的研究现状.....	6
1.3.2 超重肥胖者可能存在习惯化反应的间接证据	7
2 问题提出及研究意义	9
2.1 问题提出.....	9
2.2 研究设计.....	9
2.3 研究意义.....	10
2.3.1 理论意义.....	10
2.3.2 实践意义.....	10
2.4 研究创新.....	11
3 研究一超重肥胖者习惯化反应研究	12
3.1 目的与假设.....	12
3.2 方法.....	12
3.2.1 被试.....	12
3.2.2 问卷材料.....	12
3.2.3 工具学习任务.....	13
3.2.4 实验过程.....	15
3.2.5 数据分析.....	15
3.3 结果.....	16
3.3.1 描述性统计.....	16
3.3.2 学习阶段学习率的差异检验.....	16
3.3.3 习惯化反应的差异检验.....	19
3.3.4 测验阶段获得试次的反应差异检验.....	20
3.4 讨论.....	20
4 研究二超重肥胖者的食物习惯化反应的神经电生理研究	23
4.1 目的与假设.....	23
4.2 方法.....	23
4.2.1 被试.....	23
4.2.2 问卷材料.....	24

4.2.3 工具学习任务.....	24
4.2.4 延迟样本匹配任务.....	25
4.2.5 实验过程.....	26
4.2.6 数据分析.....	26
4.3 结果.....	29
4.3.1 描述性统计.....	29
4.3.2 行为结果.....	30
4.3.3 ERP 结果.....	32
4.3.4 MVPA 结果.....	34
4.3.5 行为结果与 ERP 和 MVPA 结果的相关.....	35
4.4 讨论.....	36
5 研究三超重肥胖者食物习惯化反应对半年后 BMI 的预测.....	40
5.1 目的与假设.....	40
5.2 方法.....	40
5.2.1 被试.....	40
5.2.2 问卷材料.....	40
5.2.3 数据分析.....	40
5.3 结果.....	41
5.3.1 相关分析结果.....	41
5.3.2 分层回归结果.....	42
5.4 讨论.....	42
6 总讨论.....	44
6.1 超重肥胖者的习惯化反应.....	45
6.2 超重肥胖者食物习惯化反应的神经机制.....	46
6.3 食物习惯化反应对未来体重的预测作用.....	47
6.4 研究不足及未来展望.....	47
7 研究结论.....	49
参考文献.....	50
附录.....	60

超重肥胖者食物习惯化反应的行为和 ERP 研究

基础心理学专业 硕士研究生 姜彦
指导教师 陈红 教授

中文摘要

世界范围内超重和肥胖人口逐年增长，超重肥胖问题威胁着人类的健康长寿。尽管有许多超重和肥胖的人意识到减肥的重要性并成功减轻了体重，但仍然在维持减肥成果上面临诸多困难。研究表明肥胖与成瘾类似，都具有持续性。成瘾者难以改变的消极行为与其目标导向和习惯控制系统的不平衡有关，继而表现出对成瘾物的习惯化反应。学习与行为控制的双系统理论（the dual-system theory）认为有两种行为控制系统：目标导向控制系统（goal-directed control system）和习惯控制系统（habitual control system）。目标导向控制系统是对反应与潜在结果之间关联的表征。受目标导向控制的行为会根据结果价值的变化，来改变和调整反应，因而具有更高的灵活性，但也需要更多的认知资源。习惯控制系统是对刺激与反应之间关系的表征，是一种自动化、高效的行为机制。由于不考虑结果的价值，因而在结果价值降低（贬值）后，仍会对刺激反应，不具有灵活性。在相同的情境下，通过反复的工具学习，目标导向控制的行为会转变为习惯控制的行为。在饮食方面，如果饮食行为受习惯控制，那么进食就会由食物线索唤起，而与实际的进食需求分离，从而导致个体在不想进食或吃饱了之后依旧产生进食行为，失去了对自己进食行为的控制，从而陷入了减肥、反弹和再减肥的循环中。因此，本研究聚焦于超重肥胖群体的学习与行为控制的双系统特征，探究超重肥胖群体在获取食物时的特点，有助于加深对超重肥胖群体普遍存在的持续的高热量饮食行为的认识。

本研究分为三个部分：

研究一，采用 Luque 等人（2020）提出的工具学习任务（采用时间压力和非时间压力两个版本）考察超重肥胖者是否存在目标导向和习惯控制系统的不平衡，并且考察这种不平衡是否为食物特异的。研究结果发现，在时间压力下超重肥胖组的 RT 转换成本（RT switch cost，改变原有习惯化反应，使其符合当前目标所需的额外的反应时）显著高于健康体重者，表明超重肥胖群体的目标导向控制系统和习惯控制系统之间存在不平衡，他们在获取食物和一般（金钱）奖赏时有更高的习惯化反应。而在非时间压力条件下，两组之间的行为差异不显著，表明时间压力能有效地揭示潜在的习惯化反应，因此，在研究二中沿用时间压力。

研究二，进一步在接近真实的进食情境中探究了超重肥胖群体对食物的习惯化反应。本研究结合了感觉特异性饱腹感范式，通过要求被试直接食用食物来降低食物的奖赏价值，使实验更符合日常的进食情境。同时采用事件相关电位技术（Event-related potentials, ERPs），探究习惯化反应的神经机制。行为结果发现超重肥胖组在工具学习任务中对贬值食物的 RT 转换

成本显著高于健康体重组，这再次证明了超重肥胖者对食物存在习惯化反应，即即便他们已经不想吃这种食物了，但也会习惯化地获取这种食物。ERP 结果发现，在工具学习任务的测验阶段，健康体重组在观看贬值线索时的 P1 振幅显著小于非贬值线索，而超重肥胖组的 P1 振幅无显著差异。对 P3 进行检验，发现在 POz 位置，超重肥胖组的 P3 振幅显著大于健康体重组；另外，在 Oz 位置，在贬值线索条件下超重肥胖组的 P3 振幅显著大于健康体重组，而非贬值线索组间差异不显著。对工具学习任务的学习阶段进行 MVPA 解码分析的结果显示，相比健康体重组，超重肥胖组在学习后期的结果表征显著减少，即经过一段时间的学习后超重肥胖群体在获取食物时的目标导向控制减弱。行为和脑电数据分析的相关结果显示，RT 转换成本与学习后期结果分类器准确性呈显著负数相关，与前后期反应表征强度的变化有负相关的趋势。另外，也发现学习后期结果分类器准确性与 Oz 位置 P1、P3 差异波成显著正相关。

研究三，对研究二中被试半年后的饮食行为和 BMI 进行施测，并采用研究二中习惯化反应的行为指标和与其相关的神经指标预测个体半年后的肥胖指数，以此探究习惯化反应的行为和神经指标是否对未来的体重具有预测作用。结果发现，饮食行为、RT 转换成本、P3 振幅及差异波和学习后期的结果分类器准确性均无法预测 BMI 的变化，但 Oz 位置 P1 差异波能显著预测变化量，即贬值条件下 Oz 位置 P1 振幅下降的越少，随后的 BMI 上升就越大。

综上，研究得出以下结论：（1）超重肥胖者目标导向控制系统和习惯控制系统之间存在不平衡，对食物和一般奖赏都表现出更高的习惯化反应；（2）超重肥胖者对食物的习惯化反应，可能与测验阶段 Oz 位置 P1 和 P3 对贬值线索的振幅升高，以及工具学习的学习后期结果表征降低有关。（3）测验阶段 Oz 位置 P1 差异波可以预测半年后的 BMI 的变化，即对贬值食物线索的注意增强可以预测未来的 BMI 上升。

本研究的主要创新：（1）本研究从奖赏学习的视角，基于学习与行为控制的双系统理论，探讨超重肥胖者的失控进食的可能原因之一，为超重肥胖者存在习惯化进食行为的假说提供了行为和电生理活动上的支持；（2）采用 MVPA 的方法分离目标导向和习惯控制系统，探究超重肥胖群体目标导向控制系统和习惯控制系统之间的不平衡，是源于目标导向控制系统的增强还是习惯控制系统的减弱；（3）结合 Luque 等人（2020）提出的对习惯化反应更加敏感的工具学习任务和具有一定生态效度的感觉特异性饱腹感范式，对超重肥胖群体食物习惯化反应进行了较为系统探讨。

以上研究表明，超重肥胖群体对奖赏有更高的习惯化反应，并且他们对食物的习惯化反应可能与对贬值食物线索的注意增加和学习后期目标导向控制的减弱有关。此外，对贬值食物线索的注意增加对半年后的体重增加具有一定的预测作用。因此，未来有必要重视习惯在减肥干预中的影响，通过建立新的习惯或者提高对饮食后结果的关注，来防止超重肥胖群体陷入减肥反弹的怪圈。

关键词：超重肥胖，目标导向和习惯控制，习惯化反应，MVPA

Habitual Food Response in Overweight and Obese People: Evidence from Behavior and Event-Related Potentials

ABSTRACT

The escalating prevalence of overweight and obesity globally poses significant threats to human health and longevity. Despite successful weight loss endeavors by many individuals within this demographic, sustaining such results remains a formidable challenge. Research delineates a resemblance between the persisting nature of obesity and addiction, attributing the difficulty in altering detrimental behaviors to an imbalance between goal-directed and habitual control systems. This leads to a predilection for habitual responses to addictive stimuli. The dual-system theory identifies two distinct behavioral control systems: the goal-directed system, which links actions to their outcomes, enabling adjustable responses based on the changing values of outcomes, thereby offering flexibility at the expense of cognitive resources; and the habitual control system, an automated, efficient mechanism that, devoid of outcome valuation, continues responding to stimuli despite depreciated outcomes, lacking flexibility. Repeated instrumental learning within the same context can morph goal-directed behaviors into habitual ones. In dietary contexts, if eating behavior is predominantly habitual, it is elicited by food cues rather than actual nutritional needs, propelling individuals towards eating even when not hungry or already sated, thereby disrupting control over eating behaviors and perpetuating a cycle of weight loss and regain. This study focused on the dual-process nature of learning and behavioral control in the overweight/obese population, examining their food acquisition traits to enhance the understanding of persistent high-calorie dietary behaviors prevalent among them. This study is divided into three parts:

Study 1 used an instrumental learning task proposed by Luque et al. (2020), with both time-pressure and non-time-pressure versions, to examine whether there is an imbalance between goal-directed and habitual control system in overweight/obese individuals, and whether this imbalance is food-specific. The results showed that under time pressure, the RT switching cost (The additional reaction time required to modify existing habitual responses to align with the current goal) of the overweight/obese group was significantly higher than that of the healthy weight group, indicating an imbalance between the goal-directed control system and the habitual control system in the overweight/obese population, who exhibited higher habitual responses when acquiring food and general (monetary) rewards. Under non-time-pressure conditions, the behavioral differences between

the two groups were not significant, indicating that time pressure can effectively reveal underlying habitual responses, thus being adopted in Study 2.

In Study 2, we further explored the habitual responses of the overweight/obese population to food in a real eating situation. Combining the sensory-specific satiety paradigm by requiring participants to directly eat snacks to reduce the reward value of the snacks made the experiment more aligned with daily eating situations. Event-related potentials (ERPs) technology was used simultaneously to explore the neural mechanisms of habituated responses. Behavioral results showed that the RT switching cost of the overweight/obese group for devalued snacks in the instrumental learning task was significantly higher than that of the healthy weight group, again proving the habitual response of the overweight/obese individuals to food, i.e., even if they no longer want to eat that food, they still exhibit habitual acquisition of it. ERP results showed that during the test phase of the instrumental learning task, the P1 amplitude of the healthy weight group when viewing devalued cues was significantly smaller than that for non-devalued cues, while there was no significant difference in the P1 amplitude of the overweight/obese group. Examining P3, it was found that at the POz position, the P3 amplitude of the overweight/obese group was significantly greater than that of the healthy weight group; moreover, at the Oz position, under devalued cue conditions, the P3 amplitude of the overweight/obese group was significantly greater than that of the healthy weight group, while there was no significant difference between the groups for non-devalued cues. The results of MVPA decoding analysis on the learning stages of tool-based learning tasks showed that, compared to the healthy weight group, the overweight/obese group exhibited a significant reduction in result representation in the later stages of learning, meaning that after a period of learning, the goal-directed control of the overweight/obese group weakened when acquiring snacks. Related analyses of behavioral and EEG data revealed that the RT conversion cost was significantly negatively correlated with the accuracy of the late reward outcome classifier, and there was a negative trend in correlation with the change in response representation strength between the early and late stages. Additionally, it was also found that the accuracy of the reward outcome classifier in the later stages of learning was significantly positively correlated with the P1 and P3 difference waves at the Oz location.

Study 3 followed up on the participants from Study 2 eight months later to measure their dietary behaviors and BMI. It employed the behavioral indicators of habitual responses and related neural indicators from Study 2 to predict individuals' BMI eight months later. This was done to explore whether the behavioral and neural indicators of habitual responses could predict future weight. The results found that dietary behaviors, RT switching costs, and the accuracy of the reward outcome classifier in the later stages of learning could not predict changes in BMI. However, the difference

ABSTRACT

wave at the Oz location P1 significantly predicted the change amount, indicating that the smaller the decrease in the amplitude of the Oz location P1 under devaluation conditions, the greater the subsequent increase in BMI.

In conclusion, the study found: (1) An imbalance exists between the goal-directed control system and the habitual control system in the overweight/obese population, showing a higher habitual response to food and general rewards; (2) The habitual response to food in the overweight/obese group may be related to the increased amplitude of P1 and P3 at the Oz location and the decreased representation of outcomes when facing clues in the later stages of instrumental learning. (3) The difference wave of P1 at the Oz location during the test phase can predict changes in BMI eight months later, suggesting that increased attention to devalued food cues can predict future increases in BMI.

The main innovations of this study are: (1) From the perspective of reward learning, based on the dual-system theory of learning and behavioral control, this study explores one possible reason for the uncontrolled eating of overweight/obese individuals, providing possible behavioral and electrophysiological support for the hypothesis of habitual eating behavior in overweight/obese individuals; (2) Further using the MVPA method to separate the goal-directed and habitual systems, the study explored the imbalance between the goal-directed control system and the habitual control system in the overweight/obese population, whether it stems from an enhancement of goal-directed or a weakening of the habitual control system; (3) Combining the instrumental learning task, which is more sensitive to habitual responses as proposed by Luque et al. (2020), and the sensory-specific satiety paradigm with certain ecological validity, the study systematically investigated the habitual response to food in the overweight/obese population.

The findings indicated that the overweight/obese population shows a higher habitual response to rewards, and their habitual response to food may be related to increased attention to devalued food cues and a weakened representation of outcomes in the later stages of learning. Moreover, increased attention to devalued food cues can predict weight gain six months later to some extent. Therefore, it is necessary to pay attention to the role of habits in weight loss interventions in the future, and by establishing new habits or enhancing attention to the outcomes after eating, to prevent the overweight/obese population from falling into the vicious cycle of weight regain.

Keywords: overweight/obesity, goal directed and habitual control, habitual response, MVPA

1 文献综述

1.1 超重与肥胖的现状与危害

近年来, 由于饮食和生活方式的变化世界范围内超重与肥胖人数迅速增长(Ezzati et al., 2017), 肥胖已成为世界上主要的公共健康问题之一。据统计, 全球肥胖儿童、青少年和成人肥胖总数已超 10 亿, 2022 年全球儿童、青少年的肥胖率约为 1990 年的四倍, 成人肥胖率增加了一倍以上(NCD Risk Factor Collaboration, 2024)。在我国, 超重与肥胖问题也同样严峻 2020 年的《中国居民营养与慢性病状况报告》的数据显示, 我国的超重和肥胖人口呈上升趋势, 我国已有超过 1/2 的成年人超重或肥胖, 6~17 岁青少年中近 1/5 超重或肥胖, 而 6 岁以下儿童中有 1/10 超重或肥胖。世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 基于身体质量指数 (body mass index, BMI) 划分正常体重和超重肥胖的标准界限, 将 BMI 指数在 18.5 - 24.9 kg/m^2 范围的划分为正常体重, BMI 指数在 25.0 - 29.9 kg/m^2 范围的划分为超重, 而 BMI 超过 30 kg/m^2 的则被划分为肥胖。此外, 腰围 (waist circumference)、腰臀比 (waist-to-hip ratio, WHR)、体脂指数 (fat mass index, FMI) 等指标也常作为区分超重肥胖与正常体重的指标。美国国家心肺血液研究所 (National Heart, Lung, and Blood Institute, NHLBI) 在 BMI 指数的基础上结合了腰围, 进一步对超重和肥胖的每一级分为两类: 若男性腰围在 102 厘米, 或女性腰围在 88 厘米以内则被认定为程度较轻, 而超过这一标准则被认定为较为严重(Pi-Sunyer et al., 1998)。超重与肥胖会影响身体、心理和认知的健康。超重和肥胖通常伴随血压、血脂和葡萄糖浓度异常, 这些因素会单独或共同作用从而增加个体患冠心病和中风的风险(Lu et al., 2014)。臃肿的体型也可能使超重和肥胖群体经历更多的社会排斥和嘲笑, 这些人通常感受到体重污名化、对自己的身体形象不满、低自尊, 并体会到更多的焦虑和抑郁情绪(Wu & Berry, 2018)。此外, 肥胖和高脂肪的饮食方式可能会导致大脑局部炎症, 损害认知功能(A.A. Miller & Spencer, 2014)。以往的元分析指出, 肥胖群体相比于正常体重群体在抑制能力和工作记忆方面都有明显的缺陷(Yang et al., 2018)。

1.2 双系统理论

双系统理论指出, 目标导向和习惯控制系统被认为是主动奖赏追求和决策过程中的两大调节系统(Malvaez, 2020; O'Doherty et al., 2017) (见图 1)。目标导向控制系统根据奖赏结果的价值选择行动, 并能灵活地使行为适应变化的环境。相比之下, 习惯控制系统依赖于 S-R 关联, 反应快, 但对结果值的变化不敏感、缺乏灵活性。在稳定的环境中, 经过奖赏的反复强化, 目标导向行为可以成为习惯(Mazar & Wood, 2018)。目标导向行为需要满足以下两个条件: (1) 主体拥有行动与结果间关系的认识 (2) 主体可以根据其当前的需求和愿望评估结果价值, 并依次决定是否执行该行动, 否则认为行为趋于习惯化(de Wit & Dickinson, 2009; Schreiner et al., 2020)。行为受习惯控制并非问题行为, 它可以被看作一种计算效率高的策略, 习惯的、

自动的反应有助于个体将注意力集中于内外部环境中的信息(O'Doherty et al., 2017); 然而, 当习惯化的行为与目标冲突时, 它被认为是不适应的(Pierce-Messick & Corbit, 2021)。如, 一个人想要减肥, 但他总是习惯化地吃高热量食物, 这时习惯化的行为阻碍了个人的目标, 被认为是一种不适应的行为。

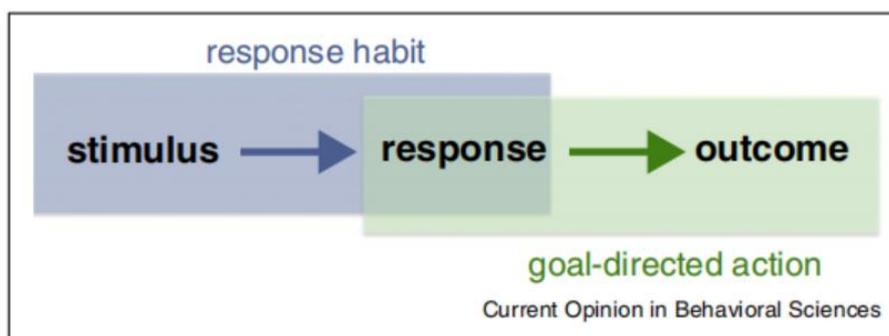


图 1 目标导向与习惯控制行为(Corbit, 2016)

Daw 等人 (2005) 提出, 目标导向和习惯控制系统之间的区别可以用两种不同类型的强化学习 (reinforcement learning, RL) 机制来解释: 目标导向控制系统被认为是基于模型的控制系统, 而习惯控制系统的概念被纳入无模型控制系统中(Daw et al., 2005; Dolan & Dayan, 2013; O'Doherty et al., 2017)。具体来说, 基于模型的控制是需要计算和评估与长期行动相关的结果, 它是基于复杂的、需要计算的、前瞻性的规划, 使用学习过的环境内部模型来构建可能的未来状态和行动的决策树, 以期获得最大的长期价值。其中, 预期结果由主体根据其当前状态进行评估, 因而对结果贬值和行为结果一致性降低敏感。无模型控制不需要复杂的计算过程, 它是基于“缓存” (记忆中储存的行动与其长期未来价值的关系) 选择行为, 它在计算上很简单, 但以缺乏灵活性为代价。缓存使得多巴胺能反应从奖赏转移到预测它们的刺激上, 缓存值与结果本身分离, 因此当环境中结果的效用的变化时, 无模型系统不能敏感地做出改变 (Daw et al., 2005)。

1.2.1 目标导向和习惯控制系统的测量方式

结果贬值任务 (outcome devaluation task) 是目前测量目标导向和习惯控制系统常用的范式, 该范式分为三个阶段: 学习阶段、贬值阶段和测验阶段(Mazar & Wood, 2018)。首先, 在学习阶段, 个体通过尝试错误的方式习得刺激、反应和结果之间的固定联系。接着, 贬值或撤销其中一个的结果 (贬值结果)。最后, 考察个体对撤销结果对应线索 (贬值条件下线索) 的反应。若被试减少了线索下对贬值结果相应行为的反应, 则认为其行为是以目标为导向的; 若被试仍继续执行与贬值结果相对应的行为, 也就是说对结果的价值变化不敏感, 即表现出习惯化行为。这类任务通常采用无意义的几何图形作为线索, 采用金钱、食物和分数作为奖赏结果。

基于传统的结果贬值范式, Gillan 等人(2011)提出 slip-of-action 任务, 与传统范式测量个体对贬值线索的反应率不同, 这一范式测量个体对贬值线索的抑制能力。该范式包含学习和测验两个部分(Gillan et al., 2011)。在学习阶段, 屏幕上呈现一系列带有水果图片的封闭盒子, 个体的任务是通过试错来学习左右两个按键中哪个键可以带来奖赏。按键反应后, 盒子会被打开, 里面会显示另一个水果奖品和一定的分数。他们获得的奖赏多少还与反应速度相关, 答对的速度越快, 得分就越高。在测验前, 被试会看到其中一种结果上面画了一个叉, 表示它不再值任何分数, 即对这种结果贬值。随后, 在测验阶段, 会快速呈现一系列的刺激, 个体需要继续对预测有价值结果的刺激(仍然得分的刺激, 即非贬值线索)做出反应, 但对预测没有价值结果的刺激(不得分/扣分的刺激, 即贬值线索)抑制反应。未能抑制对贬值线索的反应, 被称为失误反应(slip-of-action), 这一失误被认为是习惯控制的证据。

除了 slip-of-action 任务没有明确的贬值程序(通过在结果上面画了一个叉, 告知被试该结果不再得分)外, 食物的研究中常用两种贬值程序。一种是感觉特异性饱腹感(Sensory-specific satiety)的操纵常被用来降低食物当前的奖赏价值, 进而考察食物奖赏价值贬值后个体对贬值的敏感性(Horstmann et al., 2015; Reber et al., 2017)。它的操作程序为: 首先, 个体通过在不同线索下按键反应, 学会几种线索、反应和食物结果间联系, 通常采用咸味食物和甜味食物两种; 接着, 要求他随意进食其中一种食物, 吃到不想吃为止。此时, 吃到不想吃的食物对个体而言奖赏价值降低, 而没有进食的食物奖赏价值不变。Horstmann 等人(2015)采用该范式得到个体对贬值阶段进食的食物的渴望程度明显降低, 而对未进食的食物渴望程度不变。另一种贬值程序是将食物与厌恶反应联系(如, 动物研究中注射锂化氢(Adams & Dickinson, 1981))从而对食物进行贬值, 在人类研究中采用将食物与厌恶图片相联系的方法降低食物的奖赏价值(Heriseanu et al., 2020)。

然而, de Wit 和同事(2018)系统地考察了常用的结果贬值范式, 发现这类范式的指标在人类习惯化行为研究中效果不好, 可能源于被试能够在不受时间压力、压力和疲劳的影响下用目标导向行为掩盖自己的习惯化反应(de Wit et al., 2018; Wood et al., 2022)。Luque 和同事(2020)基于先前研究中习惯化指标不敏感的问题, 改进了研究范式, 提出了新的习惯化指标: RT 转换成本(RT switch cost), 即改变原有习惯化反应, 使之符合当前任务所需要付出的额外时间, 研究发现该指标比传统指标更敏感(Luque et al., 2020)。同时, 该任务引入了时间压力来促进习惯化行为的探测。研究表明, 时间压力能够暂时性地削弱目标导向控制, 促使潜在的习惯化行为被表现出来(de Wit et al., 2014; Hardwick et al., 2019; Luque et al., 2020)。一项研究调查了日常决策中被试在改变路线时的习惯化反应, 结果发现在没有时间限制的条件下执行意图可以改变习惯化反应, 而当给予时间限制时, 执行意图则无法改变习惯化反应(Betsch et al., 2004)。因此, 利用更敏感的指标并施加时间压力有利于揭示潜在的习惯化反应。

1.2.2 目标导向和习惯控制系统的神经电生理基础

目前研究大多采用神经影像技术探究目标导向与习惯控制相关的大脑结构和功能表现,但是较少使用时间敏感性高的事件相关电位技术(Event-related potentials, ERP)考察目标导向和习惯控制系统。由于习惯化反应是对线索自动化的反应,具有快速的特点。以往研究采用强制反应的方法,发现健康个体经过4天线索与按键的训练后,在300-600ms的时间段内容易出现习惯行为,而超过600ms后目标导向行为明显增多(Hardwick et al., 2019)。因此,采用时间敏感性比较高的ERP技术可能有助于看到较短时间内发生的习惯控制行为的神经电生理特点。

仅有的几篇ERP研究分别采用了工具学习任务 and Slip-of-action 任务进行了研究。采用工具学习任务的研究主要探讨了刺激呈现后的脑电活动,发现刺激后的P1和P3成分上升可能与习惯控制或刺激-反应联系有关。P1是刺激呈现后是一个波峰在刺激后80ms左右出现在枕区的正向偏转波,是与视觉早期的注意选择有关(Hillyard, Vogel, & Luck, 1998)。研究表明,与奖赏关联的线索会驱动注意力,诱发更高的P1(Hickey et al., 2010),并且即使该线索在当下的任务中不再预测奖赏后,P1效应依旧存在(MacLean & Giesbrecht, 2015; Luque et al., 2017)。Luque等人(2017)利用工具学习任务发现,当奖赏被贬值后,与奖赏大小相关的P1效应仍旧存在,表现为当通过强化学习习得了高/低奖赏与线索的关系后,即使高奖赏被撤销,与高奖赏相关的线索依旧能引起较高的P1。因此,推测P1反应了视觉皮层中类似于习惯的神经活动。P3是一个波峰在300-600ms的正向偏转波,通常被分为两个成分:P3a在额区最大,反映对环境中的意外或重要事件的注意定向;P3b在颞顶部最大,与工作记忆的更新有关(Polich, 2007)。此外,研究也发现,P3的振幅与反馈刺激的奖赏大小有关,具体而言,获得高奖赏会导致更高的P3(Sato et al., 2005),进一步研究发现,P3振幅的增加在预期奖励的线索呈现时就已经出现了,这一P3振幅的上升可能反应了动机的增强(Kleih et al., 2010; Pornpattananangkul & Nusslock, 2015)。此外,P3b可能与刺激-反应联结的重新激活有关(Verleger, 2020; Verleger et al., 2014)。一项研究采用工具学习任务,通过改变线索与反应之间的对应关系,同样在350-400ms发现了顶区P3在强的刺激-反应联结条件(同一刺激,相同的反应)下比在弱的刺激-反应联结条件(同一刺激,两个不同的反应)下有更大的振幅(Molinero et al., 2020)。另一项研究发现了一个具有长潜伏期的成分在任务要求打破原有刺激-反应联结时升高,即贬值条件下升高,具体来说该成分在刺激开始后330-440ms的枕区位置观察到差异,并且该差异在550-700ms期间更广泛地分布在枕区、中央区 and 顶区,该成分可能与P3b对应(Luque et al., 2017)。另一项采用slips-of-action的研究也发现,学习时的P3振幅能正向预测测验时的习惯控制相关的脑电活动(Yousuf et al., 2019)。

尽管目前的行为和ERP研究提供了有价值的见解,但它们测得的习惯化反应和ERP指标只能反应目标导向和习惯控制系统的失衡,即在获取奖赏时个体的习惯控制胜过目标导向

控制。因此，行为和 ERP 成分的分析无法确定这种对贬值线索的反应增加是由于目标导向控制的减少还是习惯控制的增强，亦或是两者都有影响。最近，一项研究利用多变量模式分析（multivariate pattern analysis, MVPA）可以在一定程度上克服这一局限性(Meier et al., 2022)。

多变量模式分析（MVPA）是一种通过同时考虑多个神经活动的特征来研究大脑功能的方法。与传统的单变量中分析方法不同，MVPA 关注的是在神经影像数据中同时捕获多个特征或模式，而不是独立地检查每个单独的神经特征，进而可以更精细地研究大脑对于不同刺激、任务或条件的区分和分类能力(Grootswagers et al., 2017; Peelen & Downing, 2023; Treder, 2020)。同时，这种分析不要求不同被试之间的 ERP 振幅具有一致性，而是依赖于 ERP 信号在个别被试内具有一致性，即认为每个人的 ERP 信号背后存在相对稳定的处理机制(陈新文, 李鸿杰, & 丁玉珑, 2023)。当某个时间进程中，被试内部对不同刺激条件的神经表征存在稳定差异时，解码分析可以在神经表征空间找到一条规则边界（决策边界），将不同的响应向量区分开来。这样，不同刺激类型的大脑活动模式就能被最优地区分开，实现对个体不同认知状态的分离，这种方法超越了传统分析技术仅在群体水平上分析的局限，通过对每位被试特有的大脑活动模式进行分析，提供了个体水平上的统计分析结果，有助于更深入地理解认知处理过程(陈新文等, 2023)。

近期一项研究利用多变量模式分析（Multivariate Pattern Analysis, MVPA）的方法对学习阶段的 ERP 信号进行解码，并以分类器性能作为奖赏结果和反应表征的指标(Meier et al., 2022)。在研究中，被试需要完成单独的延迟样本匹配（DMS）任务和工具学习任务。延迟样本匹配任务要求被试观看并记住屏幕中的图片，接着在一段时间延迟后，选出先前的那张图片。DMS 任务使用的材料对应工具学习任务中的反应选项和结果类别的图片，并在整个任务中记录 ERP。接着，分别对个体观看 DMS 任务中反应选项的图片和结果类型的图片时的 ERP 进行分析，利用 MVPA 训练的方法，分别训练反应选项图片的分类器和结果图片的分类器，找出区分不同反应选项和不同结果类别独特的神经特征。最后，应用训练好的分类器对工具学习任务进行 MVPA 解码，以分类器在工具学习任务中的性能表示反应表征和结果表征的使用情况，从而从神经活动层面分离出目标导向控制和习惯控制。具体来说，结果图片的分类器在这一任务中的解码结果表示目标导向控制系统的参与程度，即在刺激呈现阶段和反应阶段，被试看到刺激和反应时的神经活动表征越能区分两类结果，表明他们更多地考虑结果，即采用的是 S-R-O 的学习；而反应选项图片的分类器表示习惯控制系统的参与程度，即在刺激呈现阶段，被试看到刺激时的神经活动表征越能区分两类反应，表明他们更多地考虑反应，即采用的是 S-R 的学习。

1.3 超重肥胖与双系统

研究表明肥胖成因与成瘾类似。一方面，肥胖和成瘾行为一样具有持续性。尽管大部分超重肥胖的人报告自己想要减肥，但是很少有人能真正减重并维持自己的减重成果(Flore et al.,

2022)。想减肥的肥胖者通常会陷入一个暴饮暴食、节食然后又暴饮暴食的怪圈，这与成瘾者的上瘾、戒断然后复发的循环类似(Volkow et al., 2017)。另一方面，神经层面也发现了二者的相似性(Tomasi & Volkow, 2013; Volkow et al., 2013, 2017)，肥胖与成瘾都与以多巴胺为基础的动机系统的异常有关，这一系统的异常会改变奖赏预期、学习和习惯形成等方面(Volkow et al., 2013; Volkow et al., 2017)。

以往研究表明，成瘾者难以改变的消极行为与行为受习惯控制有关(Everitt & Robbins, 2016; Wood & Runger, 2016)，如，与药物相关的线索会唤起自发的行为反应，导致抑制系统无法监控和抑制这类反应(Belin et al., 2013)。这种行为脱离了奖赏结果对个体的当前价值，是一种非适应性的奖赏寻求行为(Malvaez, 2020)。

基于肥胖与成瘾的相似性以及相关研究，学者从双系统理论的角度提出了超重肥胖原因的新的理论假说，该假说认为超重和肥胖是主要的饮食行为的结果，是由于目标导向和习惯控制系统之间的不平衡，使个体失去了对自己饮食行为的控制(Ciria et al., 2021; Corbit, 2016, 2018)。由于过度依赖习惯系统，肥胖个体即使知道过度进食的不良后果，仍然会表现出过度进食。动物研究也发现高糖、高热量的饮食会影响多巴胺系统，降低多巴胺前体的可用性，导致行为向习惯控制转变(Corbit, 2016; Hartmann et al., 2020)，因而超重肥胖可能是习惯化进食的结果。

1.3.1 超重肥胖者习惯化反应的研究现状

目前，关于超重和肥胖群体的习惯化反应的研究还比较少，相关研究的结果也不一致。其中，四项研究考察了肥胖群体或连续 BMI 个体的食物习惯化反应，得到了不一致的结论。两项研究比较肥胖者与健康体重者之间的差异，发现不患有暴食症的肥胖群体没有表现出更高的习惯化倾向(Heriseanu et al., 2020; P. Watson et al., 2017)；然而，另外两项研究发现在没有饮食障碍的群体中，食物习惯化反应随 BMI 的上升而上升(Horstmann et al., 2015; Janssen et al., 2017)。Heriseanu 等人(2020)采用了结果贬值范式考察有暴食症的肥胖者和无暴食症的肥胖者的习惯化反应。首先，被试需要学习如何对两种刺激进行反应，从而获得对应的食物奖赏。学习阶段后，他们需要看一段虫子在其中一种食物上爬的视频，通过这种方式贬值该食物的价值，最后测量两组人对贬值后食物的反应是否存在差异，结果发现有暴食症的肥胖者仍会对这种食物线索产生显著多的反应，但无暴食症的肥胖者与健康体重者在反应量上无显著差异，表明患有暴食症的肥胖者对食物有更高的习惯化反应，而无暴食症的肥胖者没有。另一项研究采用了 slips-of-action 任务，同样未发现两类群体在抑制对贬值奖赏关联线索的反应上的差异(P. Watson et al., 2017)。然而，两项研究考察了，在没有饮食障碍的群体中，体重指数(BMI)与对食物习惯化反应的关系，这两项研究采用了感觉特异性饱腹感范式贬值食物(Horstmann et al., 2015; Janssen et al., 2017)。研究中，被试首先要学会对两种无意义图片刺激反应，以获得不同的两种食物(甜味和咸味)，并记录被试在不同图片刺激下每秒按钮的反

应率。然后，在贬值阶段，他们有 30 分钟的时间尽可能多地进食其中一种食物，通过这个过程贬值食用食物的奖赏价值。最后，再进行一次与学习阶段相同的任务，再次评估这两个刺激下的反应率。结果表明，反应率的变化程度与 BMI 负相关，即表明高 BMI 个体对奖赏贬值的敏感性降低，习惯控制增强(Horstmann et al., 2015)。同时，研究者还发现无论反应率的变化程度大小，被试同样都报告了对贬值食物的渴望减少(Horstmann et al., 2015)。

不仅是食物奖励方面，在一般奖励方面超重肥胖者是否存在更高的习惯化反应，研究结果也存在不一致。两项研究以金钱作为奖励，探究超重或肥胖者是否存在目标导向与习惯控制的不平衡。其中，一项研究结果发现相比健康体重和超重者，无进食障碍的肥胖者在金钱奖赏任务中有更高的习惯化倾向 (Janssen et al., 2020)，但另一项研究并未发现无暴食症的肥胖者与健康体重者在习惯控制方面的差异，相对的，研究发现肥胖且患有暴食症的肥胖者存在更高的习惯化倾向 (Voon et al., 2015)。

研究结果的不一致可能与所用实验程序的敏感性不足有关。由于人类能够在不受时间压力、压力和疲劳的影响下，用目标导向行为掩盖习惯化反应(de Wit et al., 2018; Wood et al., 2022)，因而在测量时可能难以通过外显的按键反应数的来推测习惯化反应的差异。

1.3.2 超重肥胖者可能存在习惯化反应的间接证据

尽管目前关于超重和肥胖群体的习惯化反应的研究比较少且结果不一致，一些对超重和肥胖群体奖赏系统的研究可能可以间接说明超重肥胖者具有习惯化反应。

对奖赏相关的线索的敏感性升高是习惯化的特点之一(Pierce-Messick & Corbit, 2021)，饮食相关的线索会降低对食物价值的敏感性，促使个体在无进食动机时(Colagiuri & Lovibond, 2015)或处于饱腹状态时(Jansen et al., 2016)获取食物。而超重和肥胖者通常被发现对食物线索特别敏感，这种特点不仅表现在行为层面，也反应在神经层面(Giel et al., 2017; Schag et al., 2013; van den Akker et al., 2014)，因而，这些食物线索很可能促使超重肥胖群体的进食行为脱离自身生理需要，而受习惯控制。

灵活的饮食行为需要个体提前评估当前的结果价值，并在当结果与预测不相符时及时更新和修正偏离结果的预测。然而，一些研究发现肥胖群体难以依据结果反馈调整线索的预测价值(Zhang et al., 2014)，尤其是当出现消极结果时，肥胖群体表现出难以从消极结果中学习(Coppin et al., 2014; Mathar et al., 2017)，这可能与持续的不灵活的反应有关。Coppin 等人(2014)要求被试对 3 个抽象符号进行反应，这 3 个抽象符号分别有高、中、低的概率会跟随奖赏，随后要求被试凭第一印象在配对呈现的两个图片中选择喜欢的那个，结果发现无论在食物或金钱奖赏条件下，相比超重或正常体重个体，肥胖者都表现出了对消极结果关联的线索的偏好。另一项研究采用内隐刺激-反应学习范式，考察非食物情境下，肥胖者能否利用预测误差信号 (a prediction error signal, PE 信号) 来调节行为(Mathar et al., 2017)。结果发现，肥胖者利用消极 PE 信号来提高内隐学习成绩的效率较低，即表现出难以利用消极 PE 信号来更新预

测并改变行为(Mathar et al., 2017), 这种从消极结果中学习能力的受损可能会促使不受控制的、习惯化的饮食模式的形成(Horstmann et al., 2015)。

在神经层面上, 以往研究发现超重肥胖者的腹侧和背侧纹状体活动在静息态和观看高热量食物图片时存在异常, 而这两个脑区分别与目标导向和习惯控制相关(Belin et al., 2013; Malvaez, 2020; 董晨杰, 梁晶晶, 董玉媛, 郑钟艳, & 彭子文, 2018)。研究表明, 相比健康体重者, 超重肥胖者在观看高热量食物图片时背侧纹状体激活水平更高(Rothmund et al., 2007), 并且静息态下肥胖者的双侧壳核的节点度和效率降低(Baek et al., 2017)。此外, 纵向研究发现, 尾状核和壳核对食物反应性的变化能够预测未来的体重增加。Burger 和 Stice (2014) 发现尾状核对食物获得的激活下降的趋势能够预测青春期女生的 BMI 的增加(Burger & Stice, 2014), 而尾状核和壳核静息状态下的功能连接减弱与食物决策过程中更大的冲动性相关, 并能预测半年后 BMI 的增加(Gao et al., 2018), 背侧尾状核与感觉运动皮层的功能联结增加可以预测一年后的 BMI 增加(Contreras-Rodríguez et al., 2017)。这些神经方面的改变可能与超重肥胖群体的习惯控制倾向有关。

综上, 由于目前关于超重或肥胖个体习惯化反应的研究相对匮乏且不一致, 但从超重和肥胖群体对奖赏相关的线索的敏感性升高、难以利用结果反馈调整线索预测价值和纹状体活动异常的研究结果来看, 本研究推测超重和肥胖的个体可能在进食行为上存在目标导向和习惯控制系统的失衡, 从而使行为不受目标导向系统的控制, 表现出对习惯控制系统的依赖。

2 问题提出及研究意义

2.1 问题提出

目前对于超重肥胖者习惯化反应的研究较少，任务测量的敏感性不高，如奖赏贬值任务、slip-of-action 任务、两阶段任务(two-stage task)等，得到的结果存在较大分歧(Ciria et al., 2021)。一些研究发现超重或肥胖群体能根据奖赏价值的变化，灵活地调整行为，表明他们对习惯控制系统没有过度依赖(Heriseanu et al., 2020; Voon et al., 2015)；然而，另一些研究发现肥胖者相比于超重和健康体重者对目标导向控制系统的依赖降低(Janssen et al., 2020)，也发现高 BMI 个体对食物奖赏贬值的敏感性降低(Horstmann, Fenske, & Hankir, 2015; Janssen et al., 2017)。这可能由于先前研究采用的实验操作使得目标导向控制系统掩盖了习惯化反应，阻碍了习惯化反应的测量(de Wit et al., 2018)。因此，为了更准确地测得超重肥胖者可能存在的食物习惯化反应，本研究采用了 Luque 等人(2020)年提出的工具学习任务(时间压力和非时间压力两个版本)，基于反应时来测量习惯化反应，以期对超重肥胖者是否存在食物习惯化反应的问题进一步澄清(Luque et al., 2020)。其次，以往研究大多采用静息态脑影像的方法考察超重肥胖者的习惯控制系统，该方法对于神经活动时间上的变化并不敏感。由于习惯行为发生得较早，因此本研究采用具有高时间分辨率的 ERP 技术，从神经电生理层面为超重肥胖者的习惯化反应提供证据。同时，为了能够探索超重肥胖者对习惯控制的依赖是源于目标导向控制的减少还是习惯控制的增强，或者两者都有，本研究采用 MVPA 的方法对工具学习任务的学习阶段进行解码，并试图通过学习阶段的神经电生理活动来预测随后的习惯化反应，为随后的习惯化反应提供原因和解释。最后，以往动物研究发现高糖高脂的饮食方式会改变大脑功能，可能使个体的行为和奖赏学习过程在超重肥胖的外显特征出现前就已经发生改变，并进一步影响体重的发展。因此，采用半年后的追踪研究，考察习惯化反应以及相关的指标对半年后体重变化的预测效果。

2.2 研究设计

为了探讨超重肥胖者的食物习惯化反应的行为表现与神经机制，本研究分为三个部分：

研究一，探索超重肥胖者习惯化反应的行为表现。以往研究对超重肥胖者是否存在习惯化反应的研究结果不一致，这可能与实验范式和测量指标的不敏感有关。因此，研究一采用 Luque 等人(2020)提出的工具学习任务(采用时间压力和无时间压力两个版本)，采用对习惯化更敏感的指标 RT 转换成本(改变原有习惯化反应，使其符合当前行为-奖赏关系所需的反应时)，在行为层面探索超重肥胖者的习惯化反应。同时，使用食物和金钱两种奖赏，考察超重肥胖者的习惯化反应是否是食物特异的。

研究二，在研究一的基础上，重点考察超重肥胖者食物习惯化反应。采用 Luque 等人(2020)时间压力下的工具学习任务与经典的感觉特异性饱腹感范式结合，使实验更具生态效度。感

觉特异性饱腹感范式是在实验过程中给被试提供某种食物，要求他们在一定时间内吃到不想吃为止，以此来降低这种食物的奖赏价值。这种操作更符合日常的进食情境，更具生态效度地考察超重肥胖者的食物习惯化反应。并且，采用 ERP 技术，在神经电生理活动层面探讨超重肥胖者的食物习惯化反应，为这一倾向提供神经电生理证据；采取 MVPA 解码，进一步分析食物习惯化反应是源于目标导向控制系统减弱，还是习惯控制系统增强，又或者是两者兼有。

研究三，在前两项研究的基础上，基于超重肥胖者食物习惯化反应的行为和神经电生理指标，预测个体半年后的肥胖指数，以此探究食物习惯化反应是否对体重变化具有预测作用。

2.3 研究意义

2.3.1 理论意义

本研究聚焦于超重肥胖群体的特征，探究超重肥胖群体在食物获取上的特点，有助于加深对超重肥胖群体普遍存在的持续的高热量饮食行为的认识。以往研究发现，相比与主观报告的内部状态，习惯在解释日常行为时有更高的解释效力(Mazar & Wood, 2021)。然而，目前已有研究对于超重肥胖者是否比健康体重者有更多的食物习惯化反应存在分歧。造成这一结果的原因，一方面可能是施测指标对习惯化反应不够敏感；另一方面可能是实验情境允许目标导向行为的发生（如，相对宽裕的反应时间），因而使得习惯化反应被掩盖了。因此，本研究采用 Luque 等人（2020）提出的工具学习任务，采用无时间压力和有时间压力的两种版本的范式，以 RT 转换成本作为习惯化反应的指标，研究超重肥胖者潜在的习惯化反应。

同时，本研究对超重肥胖者的食物习惯化反应的神经电生理活动进行探究，利用 ERP 分析和 MVPA 解码的方式，较为详细地分析超重肥胖者食物习惯化反应的神经机制，以及究竟是哪方面的系统缺陷导致了超重肥胖者食物习惯化反应的增加，为超重肥胖者存在习惯化进食的假说提供新的行为和电生理的证据。

2.3.2 实践意义

超重肥胖问题威胁着人类的健康长寿。饮食行为由习惯控制，会导致进食由食物相关线索唤起，而与进食需求分离。因而，超重和肥胖群体即使知道过度进食会导致的消极后果，但仍旧无法控制自己的进食行为(Moore et al., 2017)，这也使超重和肥胖群体容易陷入减肥、反弹和再减肥的循环中，难以长期维持减肥效果(Gardner et al., 2021)。近些年，习惯在超重肥胖的干预中被重视 (Cleo et al., 2020; Cleo, Isenring et al., 2017; Gardner et al., 2021)。最近的一项元分析发现，基于习惯的体重干预具有较好的效果，并且部分研究也报告了对维持减肥后体重具有作用 (Cleo et al., 2020)。因此，识别超重肥胖者的进食行为是否受习惯控制，并考察其相关的神经电生理证据，有助于今后进一步探索干预肥胖和维持减肥效果的方法，具有一定的实践意义。

2.4 研究创新

第一，理论贡献方面。本研究从奖赏学习的视角，基于学习与行为控制的双系统理论，探讨超重肥胖者的失控进食的可能的原因之一。由于目前关于超重肥胖者习惯化反应的研究相对匮乏且不一致，考虑到以往研究常用的范式对人类习惯化反应不够敏感，本研究采用 Luque 等人（2020）提出的工具学习任务，为超重肥胖者存在习惯化进食行为的假说提供了可能的行为和电生理活动上的支持。此外，目前研究只笼统地考察了超重肥胖者是否存在目标导向和习惯控制系统的不平衡，而未有研究考察究竟是目标导向控制系统减弱还是习惯控制系统的增强。因此，本研究采用 MVPA 的方法在神经层面分离两种过程，以期进一步了解不平衡的原因。

二，方法创新。本研究从行为、神经电生理两个层面对超重肥胖群体的食物习惯化反应进行研究。首先，采用了 Luque 等人（2020）提出的对习惯化反应更加敏感的工具学习任务，探究超重肥胖者潜在的习惯化的进食行为倾向；其次，研究二将结合经典的感觉特异性饱腹感范式，考察超重肥胖群体在真实进食过后是否存在习惯化反应，使研究更具有生态效度；同时，实验技术和分析方法上结合了行为与 ERPs 技术，提供了超重肥胖群体的食物习惯化反应的行为和神经电生理层面的证据。

第三，应用价值上，当下我国的超重肥胖人口持续增长，探讨超重和肥胖的成因以及其后果具有重要意义。本研究探究超重肥胖者的食物习惯化反应以及其神经电生理机制，有利于未来针对习惯化的不良饮食习惯进行干预，促进减肥干预效果的维持。

3 研究一 超重肥胖者习惯化反应研究

3.1 目的与假设

采用 Luque 等人 (2020) 的工具学习任务的时间压力和非时间压力两个版本, 考察超重肥胖者与健康体重者在习惯化反应上是否存在差异。同时, 采用金钱和食物两种奖赏, 考察该差异是否是食物特异的。假设如下:

(1) 无时间压力条件下, 食物和金钱奖赏条件下超重肥胖组与健康体重组的 RT 转换成本无显著差异, 即两组群体的习惯化反应没有表现出差异。

(2) 时间压力条件下, 相比健康体重组, 超重肥胖组在食物条件下的 RT 转换成本更高, 而在金钱条件下两组没有差异, 即超重肥胖组对食物有特异性的习惯化反应。

3.2 方法

3.2.1 被试

在西南大学校内通过广告或论坛随机招募大学生志愿者, 共发放问卷 210 份, 筛选出超重肥胖者 31 名, 并匹配健康体重组 36 名。超重肥胖组要求 BMI 在 $25\text{kg}/\text{m}^2$ 以上, 健康体重组在 $18\text{-}24\text{kg}/\text{m}^2$ 。删除 3 名被 EDDS 划分为进食障碍的被试, 6 名在最后一个学习 block 中正确率低于 75% 的被试。最后超重肥胖组保留了 27 名被试 (其中 8 名男性), 健康体重组保留了 31 名被试 (其中 8 名男性) 的数据。超重肥胖组被试的平均年龄为 ($M=20.41$, $SD=1.28$), BMI 范围为 $25.23\text{-}31.47\text{kg}/\text{m}^2$, 平均 BMI 为 ($M=27.83$, $SD=2.09$); 健康体重组被试的平均年龄为 ($M=20.39$, $SD=1.15$), BMI 范围为 $18.03\text{-}23.93\text{kg}/\text{m}^2$, 平均 BMI 为 ($M=20.95$, $SD=1.72$)。所有被试视力或矫正视力正常, 均无色盲或色弱, 无进食障碍, 无吸烟、酗酒或精神疾病史。实验前 3 小时禁食。本次实验通过西南大学心理学部伦理委员会的批准, 实验前被试均签署了知情同意书。实验结束后, 告知被试实验目的并给予相应报酬。

3.2.2 问卷材料

荷兰饮食行为问卷 (The Dutch Eating Behavior Questionnaire, DEBQ)。该问卷由 van Strien 和同事 (1986) 编制 (van Strien et al., 1986), 用于测量饮食行为倾向。包含 33 个题目, 用于测量三种饮食行为, 限制性饮食 (10 个题), 情绪性饮食 (13 个题) 和外因性饮食 (10 个题)。采取 5 点计分法 (1=从不, 5=总是), 得分越高表示对该题饮食行为陈述的认同程度越高。DEBQ 在中国样本中具有足够的结构效度 (Kong et al., 2013)。本研究中, 限制性饮食分量表的 Cronbach's alpha 系数为 0.723, 情绪性饮食分量表的 Cronbach's alpha 为 0.909, 外因性饮食分量表的 Cronbach's alpha 系数为 0.770。

进食障碍诊断量表 (the Eating Disorder Diagnostic Scale, EDDS)。该问卷包含 22 个题项, 用于评估 DSM-IV 中神经性厌食症、神经性贪食症和暴饮暴食症的诊断症状, 使用李克特、

是-否和频率量表,能可靠地区别患有和没有饮食障碍的个体(Stice et al., 2000)。该量表可将所有题目加总作为进食障碍程度的指标,或者利用评分标准筛查个体是否患有进食障碍(Stice et al. 2000;Stice et al. 2004),现有研究已将该量表用于排除可能患有饮食障碍的被试(Simpson et al., 2020)。本研究依据该量表对可能患有进食障碍的被试进行排除。

抑郁焦虑压力量表-21(the Depression Anxiety Stress Scales, DASS-21)。由 Lovibond 和 Lovibond(1995)年编制(Lovibond & Lovibond, 1995),可以测量抑郁、焦虑和压力三个方面,抑郁量表包含 7 个项目,测量与焦虑情绪(如悲伤或无价值)相关的典型症状。该量表采用 4 点计分,从 0(从不)到 3(总是),分数越高表示对应情绪程度越高。本研究中仅采用该量表的抑郁维度。抑郁维度分量表的 Cronbach's alpha 系数为 0.859。

正负性情绪量表(Positive and Negative Affect Scale, PANAS)。该量表包括 10 个负面情感词汇和 10 个正面情感词汇,要求被试对过去两周内体验到这些情绪形容词的程度进行从 1(完全没有)到 5(非常强烈)的评级(D. Watson et al., 1988)。积极情绪分量表与消极情绪分量表的 Cronbach's alpha 系数分别为 0.879 和 0.886。

主观饥饿度评分。使用视觉模拟量表(visual-analog scale, VAS)评估饥饿度、饱腹感和进食渴望程度,采用 0(一点都不)到 100(非常)的评分。

3.2.3 工具学习任务

采用改进后的工具学习任务(Luque et al., 2017; Luque et al., 2020),考察目标导向和习惯控制对行为的影响。该任务包含两个阶段:学习阶段和测验阶段。

学习阶段。被试被要求扮演太空交易员的角色,与屏幕两侧的两个外星人进行交易,通过与来自两个部落(绿色外星部落和蓝色外星部落)的外星人交换图片来换取奖赏。由于每个部落只喜欢特定的两张图片,所以当给予外星人他们喜欢的图片时会获得更大的奖赏,而若给予他们不喜欢的图片,则只能获得小奖赏。这些奖赏都被装在对应的礼盒中。

对于每种食物或金钱条件,都有四种图片刺激(两个高价值刺激和两个低价值刺激)和三种礼盒,表示奖赏结果(分别对应三种高奖赏、中等奖赏和低奖赏)。对于高价值刺激,当给予喜欢它的外星人(最优反应)后,会获得高奖赏礼盒;对于低价值刺激,最优反应则导致中等奖赏礼盒。对于所有的刺激,当给予不喜欢它的外星人(次优反应)会产生低奖赏礼盒。当被试做出最优反应时,就会给出相应的奖赏礼盒,然后告诉被试他们获得了什么奖赏,并伴随着“我喜欢它”/“我不喜欢”的信息。即当被试做出最优反应时,会获得高/中等奖赏礼盒,然后会看到他们获得的奖赏,并伴随着“我喜欢它”的信息;当被试做出次优反应时,会获得低奖赏礼盒,并伴随着“我不喜欢它”的信息。

在金钱条件下,高奖赏表示 100 个代币,中等奖赏表示 10 个代币,低奖赏表示 5 个代币。在食物条件下,高奖赏表示大量食物(如,一堆薯片),中等奖赏表示中等份量食物(如,两片薯片),低奖赏表示极少份量食物(如,一片薯片)。在食物条件下使用的食物是由每

个被试在任务开始前从六种食物（三种咸食物和三种甜食物）中选择的。学习阶段线索、反应和奖赏的关系见表 1。

表 1 学习阶段线索、反应和奖赏的关系

线索	反应	食物任务奖赏	金钱任务奖赏
高奖赏线索→	最优反应→	大量食物	100 个代币
高奖赏线索→	次优反应→	极少份量食物	5 个代币
低奖赏线索→	最优反应→	中等份量食物	10 个代币
低奖赏线索→	次优反应→	极少份量食物	5 个代币

在每个试次开始时，在屏幕的中央呈现 200-300ms 的中心注视点。然后，屏幕中央呈现一张图片，200ms 后在屏幕两侧分别呈现两个外星人。被试需要通过按“F”键/“J”键来选择与哪个外星人进行交易（“F”键表示与左侧的外星人进行交易，“J”键表示与右侧的外星人进行交易）。在完成选择后，根据选择的不同屏幕中央会出现对应的一个礼盒。800ms 后，在礼盒的位置呈现礼盒内的奖赏。如果被试的回答时间超过限定时间，屏幕上会出现“超时，请快速反应”的提示，持续 1000 秒。根据 Luque 等人（2020）的工具学习任务的研究，采用两种反应限定时间。一种为无时间压力的情况，另一种为有时间压力的情况。在无时间压力的情况下反应限定时间为 4000ms，而在时间压力的情况下反应限定时间为 500ms。限定反应时间的操作可以降低目标导向控制系统在测量习惯化反应时的干扰，有利于习惯化反应的探测(Hardwick et al., 2019)。实验前，被试被告知，他们在每次实验中获得的奖赏将会累积起来，实验结束后可以兑换为食物和现金。在这个阶段，被试通过试错来学习 S-R-O 的关系。

测验阶段。因为目标导向行为和习惯控制行为之间的关键区别取决于行为是否对结果贬值敏感(Adams & Dickinson, 1981)，所以在测验阶段中通过贬值高奖赏结果，探测被试是否仍然继续执行这一奖赏对应的反应。被试被告知，由于外星人的疏忽，先前里面装有最高奖赏的礼盒内未放奖赏。因此，在测验阶段，被试无论获得多少这种礼盒都无法增加其获得奖赏的数量（即结果被贬值了）。此时，被试只有通过按另一侧的按键，进行次优反应来获得低奖赏礼盒，才能保证在这一次交易中仍获得奖赏。研究表明，切换这一反应的能力能够反映习惯化反应(Hartogsveld et al., 2022; Luque et al., 2020)。反应的切换引起了目标导向控制系统和习惯控制系统之间的冲突，导致选择当前仍然有价值的刺激需要更长的反应时间。这一阶段额外的反应时间被称为 RT 转换成本，用于测量对奖赏的习惯化反应。该阶段的程序与学习阶段基本一致，除了礼盒后以“??”代替奖赏的呈现，以阻止测验阶段新的学习。测验阶段线索、反应和奖赏的关系见表 2。

表 2 测验阶段线索、反应和奖赏的关系

线索	反应	食物任务奖赏	金钱任务奖赏
高奖赏线索（贬值线索）→	最优反应→	无食物	0 个代币
高奖赏线索→	次优反应→	极少份量食物	5 个代币

低奖赏线索→	最优反应→	中等份量食物	10 个代币
低奖赏线索→	次优反应→	极少份量食物	5 个代币

此外，为了测试 S-O 知识，每个 block 增加了两个获得试次（consumption trial），被试可以直接从两个结果中选择一个获得奖赏。每个 block 包含 50 个试次，包括 48 个学习试次和 2 个获得试次。在每个 block 内，获得试次总是在第 20 个和 40 个试次出现。在这两种奖赏情况下，任务都是从三个无时间压力的学习 block 和一个贬值测验 block 开始的，然后，被试被告知外星人很匆忙，所以他们需要尽快与他们做交易。之后，他们在高时间压力下完成一个学习 block（S-R-O 关系与先前的 3 个学习 block 相同）和一个贬值 block。实验流程如图 2 所示。

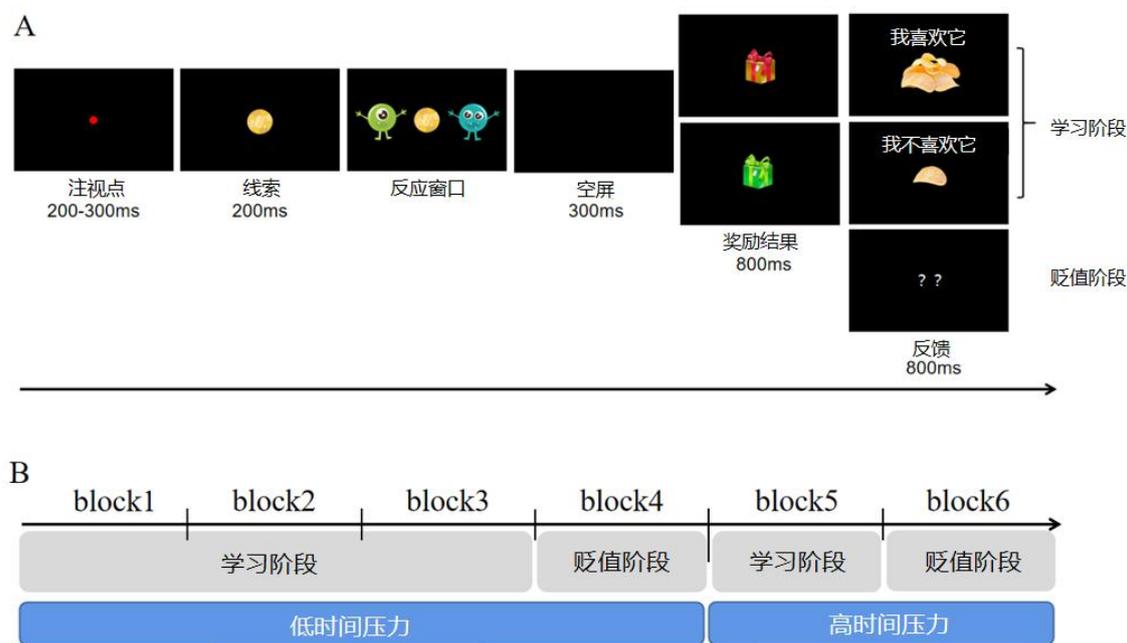


图 2 实验试次流程和整体流程

3.2.4 实验过程

所有被试要求在实验开始前 3 小时不得进食，可以饮水。来到实验室后先完成饥饿度、饱腹感、进食渴望程度、情绪与进食行为问卷的评分，随后进行工具学习任务，金钱和食物任务完成的顺序在被试间平衡。最后测量体重。

3.2.5 数据分析

首先，采用独立样本 T 检验考察年龄、BMI、情绪、饮食行为和主观食欲是否具有组间差异，采用卡方检验考察性别是否具有组间差异。由于本研究只对高价值刺激进行了贬值，所以在进一步的分析中将重点放在了高价值奖赏的学习率和习惯化反应上。接着，分别比较两组群体在无时间压力和有时间压力学习阶段的学习程度是否存在差异。然后，用在贬值 block 中转变高奖赏线索下反应的反应时减去最后一个学习 block 中获得高奖赏的最优反应的反应时，

来计算 RT 转换成本，RT 转换成本越大表示习惯化反应越强。在此基础上，采用两个重复测量方差分析分别比较不同时间压力范式下，区组和奖赏类型对 RT 转换成本的影响。最后，由于获得试次中的最优反应呈非正态分布，采用 Mann-Whitney U 检验在测验阶段对结果价值认识是否存在群体差异进行检验。用 Greenhouse-Geisser 方法调整 p 值的球形度。事后检验使用 Bonferroni 调整进行多重比较。

3.3 结果

3.3.1 描述性统计

两组被试的描述性统计结果如表 3 所示，超重肥胖组和健康体重组被试在年龄、饥饿程度、饱腹程度和进食渴望、限制性饮食和情绪问卷得分上没有显著差异 ($p>0.05$)。

表 3 超重肥胖组与健康体重组在控制变量上的描述统计和差异检验 (M±SD)

变量	超重肥胖组 (n=27)	健康体重组 (n=31)	t	p
年龄	20.407±1.279	20.387±1.145	0.064	0.949
BMI***	27.833±2.093	20.945±1.721	13.750	<0.001
饥饿程度	54.000±23.823	51.194±22.279	0.463	0.645
饱腹感	25.963±22.449	33.065±22.399	-1.203	0.234
进食渴望	55.519±26.257	50.936±22.463	0.717	0.477
限制性饮食	3.171±0.686	3.296±0.816	-0.626	0.534
情绪性饮食	2.615±0.479	2.692±0.682	-0.502	0.618
外因性饮食	3.519±0.471	3.565±0.507	-0.356	0.723
抑郁得分	3.704±3.473	4.484±3.749	-0.818	0.417
积极情绪	26.926±6.586	27.290±5.197	-0.235	0.815
消极情绪	22.407±8.168	22.710±6.944	-0.152	0.879

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

3.3.2 学习阶段学习率的差异检验

为了比较超重肥胖组和健康体重组在学习金钱和食物奖赏反应是否存在差异，分别采用 2 区组 (超重肥胖组, 健康体重组) × 2 奖赏类型 (食物, 金钱) × 3 训练 (block1, block2, block3) 的重复测量方差分析对无时间压力下的最优反应率和反应时分析，采用独立样本 T 检验对时间压力下学习 block (block5) 的最优反应率和反应时分析。4 个阶段的最优反应率和反应时的描述统计见表 4。

表 4 超重肥胖组与健康体重组的描述统计 (M±SD)

变量	超重肥胖组 (n=27)	健康体重组 (n=31)
----	--------------	--------------

研究一 超重肥胖者习惯化反应倾向研究

最优反应率		
食物 block1	0.821±0.111	0.781±0.153
食物 block2	0.926±0.118	0.936±0.088
食物 block3	0.927±0.122	0.948±0.053
食物 block5	0.870±0.116	0.893±0.107
金钱 block1	0.778±0.127	0.758±0.164
金钱 block2	0.909±0.086	0.890±0.107
金钱 block3	0.928±0.068	0.952±0.048
金钱 block5	0.843±0.115	0.847±0.128
反应时		
食物 block1	0.565±0.172	0.544±0.161
食物 block2	0.408±0.153	0.387±0.142
食物 block3	0.390±0.148	0.356±0.126
食物 block5	0.341±0.060	0.330±0.051
金钱 block1	0.589±0.192	0.551±0.158
金钱 block2	0.511±0.216	0.458±0.172
金钱 block3	0.456±0.160	0.403±0.156
金钱 block5	0.360±0.081	0.342±0.062

结果发现, 无时间压力条件下, 对于最优反应率, 训练的主效应显著 ($F_{(2, 112)} = 80.428, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.590$), 结果见图 3; 对于反应时, 训练×奖赏类型的交互作用显著 ($F_{(2, 112)} = 4.755, p = 0.010, \eta_p^2 = 0.078$), 训练的主效应显著 ($F_{(2, 112)} = 102.829, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.647$), 奖赏类型的主效应显著 ($F_{(1, 56)} = 4.443, p = 0.004, \eta_p^2 = 0.074$), 其他效应均不显著 ($ps > 0.200$), 结果见图 4。进一步进行简单效应检验发现, 训练的后两个 block 中食物条件下的反应时显著小于金钱条件的反应时 (block2 中 ($F_{(1, 56)} = 8.334, p = 0.006, \eta_p^2 = 0.130$), block3 中 ($F_{(1, 56)} = 5.813, p = 0.019, \eta_p^2 = 0.094$)), 表明两组人学习食物线索-反应-结果的关系快于对于金钱线索-反应-结果的关系的学习, 并且对食物的学习效果优于对金钱的学习效果。此外, 没有发现超重肥胖组和健康体重组在金钱和任务的学习率上的差异, 并且在 block3 中平均的最优反应率皆为 90%以上, 表明两组人群均习得了线索与反应的关系。

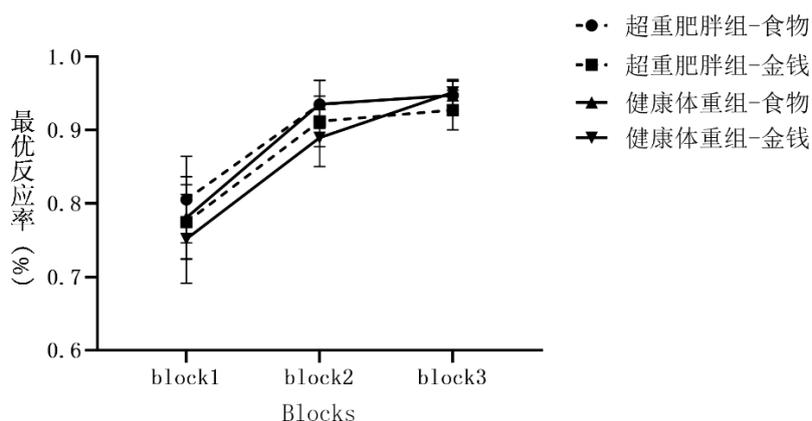


图 3 两组在学习阶段的最优反应率变化（无时间压力下）

注：误差条表示均值的 95 %置信区间（同下）。

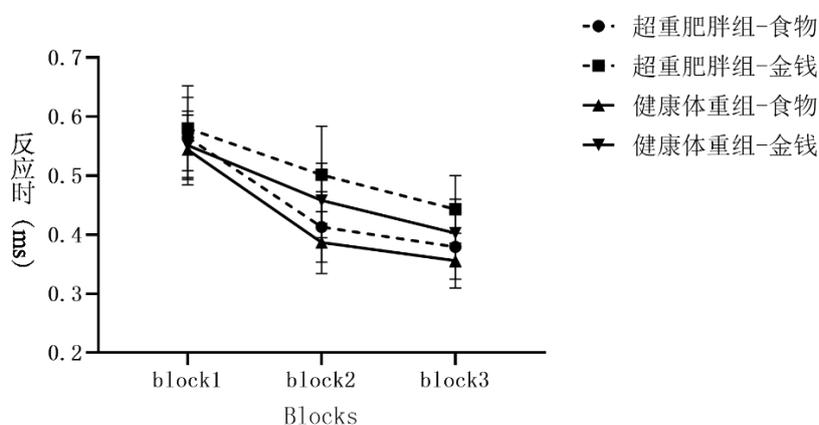


图 4 两组在学习阶段的反应时变化（无时间压力下）

在时间压力条件下，独立样本 T 检验也未发现两组人在最优反应率（食物 ($t_{(1,56)} = -0.752, p = 0.455, d = -0.206$), 金钱 ($t_{(1,56)} = -0.130, p = 0.897, d = -0.033$) 和反应时上的差异（食物 ($t_{(1,56)} = 0.880, p = 0.423, d = 0.198$), 金钱 ($t_{(1,56)} = 0.927, p = 0.358, d = 0.250$), 表明在时间压力条件下贬值测验阶段前，两组人的学习水平相似。结果见表 5。

表 5 时间压力下两组学习表现的比较 (M±SD)

变量	超重肥胖组 (n=27)	健康体重组 (n=31)	t	p
食物反应时	0.341±0.060	0.330±0.051	0.800	0.427
食物最优反应	0.870±0.116	0.893±0.107	-0.752	0.455
金钱反应时	0.360±0.081	0.342±0.062	0.927	0.358
金钱最优反应	0.843±0.115	0.847±0.128	-0.130	0.897

3.3.3 习惯化反应的差异检验

为了比较超重肥胖组和健康体重组对金钱和食物奖赏反应是否存在习惯化倾向上的差异，采用 2 时间压力（无时间压力，时间压力）× 2 区组（超重肥胖组，健康体重组）× 2 奖赏类型（食物，金钱）的重复测量方差分析对失误反应和 RT 转换成本分析。描述统计见表 6。

表 6 超重肥胖组与健康体重组习惯化反应的描述统计 (M±SD)

变量	超重肥胖组 (n=27)	健康体重组 (n=31)
无时间压力		
食物-失误反应	2.741±3.392	3.710±3.681
食物-RT 转换成本	0.161±0.117	0.184±0.151
金钱-失误反应	3.630±2.589	4.452±5.347
金钱-RT 转换成本	0.209±0.152	0.206±0.178
有时间压力		
食物-失误反应	5.852±2.783	4.871±2.814
食物-RT 转换成本	0.048±0.049	0.017±0.063
金钱-失误反应	6.444±2.873	6.613±4.522
金钱-RT 转换成本	0.049±0.079	0.031±0.059

对失误反应数的分析发现，时间压力的主效应显著 ($F_{(1,56)} = 38.261, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.406$) (见图 5 (左))，表明时间压力的操纵有效。类型的主效应边缘显著 ($F_{(1,56)} = 3.848, p = 0.055, \eta_p^2 = 0.064$) (见图 5 (中))，表明两组人都倾向在金钱条件下有更多的习惯化反应。时间压力×区组的交互作用边缘显著 ($F_{(1,56)} = 3.031, p = 0.087, \eta_p^2 = 0.051$) (见图 5 (右))，进一步尝试进行简单效应检验未发现某一条件在另一条件上的作用显著。尽管没有统计学上显著，这一交互的结果也可能反应时间压力倾向于对超重肥胖组的习惯化反应有更大的影响。其他效应均不显著 ($ps > .270$)。

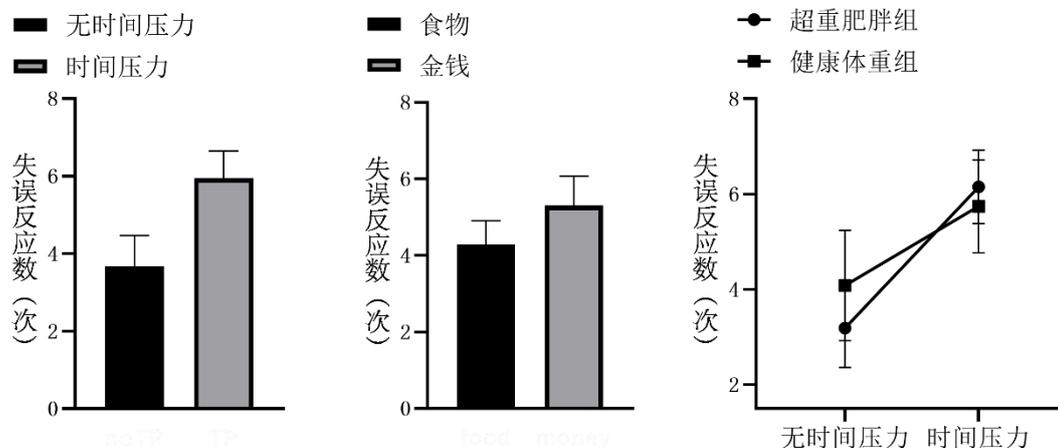


图 5 不同时间压力、奖赏类型下和两组在不同时间压力下的失误反应数的差异

对 RT 转换成本的分析发现，时间压力的主效应显著 ($F_{(1,56)} = 120.293, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.682$)，其他效应均不显著 ($ps > 0.230$)。由于时间压力对 RT 转换成本的影响很大，因此分别对两个非时间压力范式和时间压力范式下的 RT 转换成本进行 2 区组（超重肥胖组，健康体重组） \times 2 奖赏类型（食物，金钱）的重复测量方差分析。

无时间压力范式下，重复测量方差分析结果发现区组与奖赏类型的交互作用不显著 ($F_{(1,56)} = 1.503, p = 0.225, \eta_p^2 = 0.026$)；区组的主效应不显著 ($F_{(1,56)} = 0.126, p = 0.724, \eta_p^2 = 0.002$)，奖赏类型的主效应不显著 ($F_{(1,56)} = 0.203, p = 0.654, \eta_p^2 = 0.04$)。

时间压力范式下，重复测量方差分析结果发现区组的主效应显著 ($F_{(1,56)} = 4.303, p = 0.043, \eta_p^2 = 0.071$)（见图 6）。区组与奖赏类型的交互作用不显著 ($F_{(1,56)} = 0.296, p = 0.588, \eta_p^2 = 0.005$)；奖赏类型的主效应不显著 ($F_{(1,56)} = 0.437, p = 0.511, \eta_p^2 = 0.08$)。表明相比于健康体重组，超重肥胖组需要更多时间改变习惯化反应，有更高的习惯化反应。

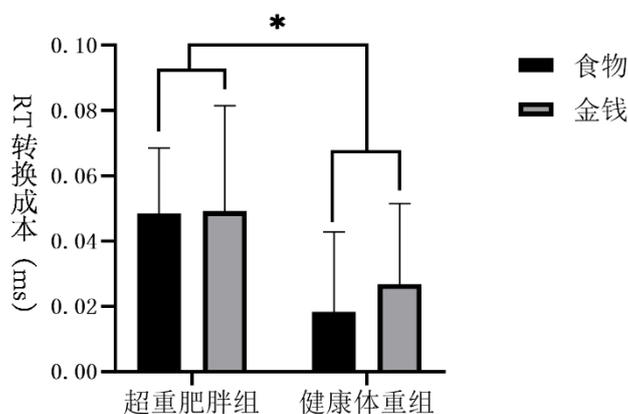


图 6 RT 转换成本的差异

3.3.4 测验阶段获得试次的反应差异检验

为了检验两组群体是否理解贬值规则，采用 Mann-Whitney U 检验考察测验阶段获得试次的正确率是否存在组间差异。结果发现，在金钱和食物两类奖赏时两组的平均正确率均在 80% 左右，且在食物条件 ($Z = -0.255, p = 0.799$) 和金钱条件 ($Z = -0.402, p = 0.688$) 下组间差异均不显著。

3.4 讨论

基于学习与行为控制的双系统理论，本研究采用 Luque 等人（2020）改进后的工具学习任务，考察超重肥胖者是否具有习惯化反应。结果发现，相比于健康体重者，超重肥胖者在高时间压力下对食物和金钱奖赏的 RT 转换成本显著增加，表明超重肥胖者的习惯化反应增加，即当按照原有反应不再能获得奖赏时，超重肥胖者需要更长的时间改变自己的行为，来适应当前任务的目标。然而，在没有时间压力的情况下，两组的 RT 转换成本没有显著差异，即在无时间压力条件下无法观察到超重肥胖者的习惯化反应。此外，未发现超重肥胖组和健康体

重组之间存在饥饿度、进食渴望、情绪上的差异，表明 RT 转换成本的组间差异不受这些变量的影响。

研究结果揭示了超重肥胖者的目标导向控制系统和习惯控制系统之间不平衡。正如预测的那样，相比健康体重者，超重肥胖者表现出对奖赏的习惯化反应增加，特别是当目标导向控制系统受到限制时。部分符合先前对与连续 BMI 群体的习惯化反应的研究，即较高的 BMI 与对食物的习惯化反应增加有关(Horstmann et al., 2015; Janssen et al., 2017)。

习惯是直接由情境线索激活的，而对具有特定结果的价值没有有意识的预期(Wood et al., 2022)，因而超重肥胖者的习惯化反应增加可能与他们对奖赏线索的高度敏感性有关。先前的研究表明，超重肥胖者与对食物线索(Hendrikse et al., 2014; Verdejo-Román et al., 2017)和金钱线索(Verdejo-Román et al., 2017; Balodis et al., 2013)的反应性增加，更高的 BMI 也与奖赏敏感性也增加有关(De Decker et al., 2016)。现有研究表明，与先前的奖赏有关的对象可以吸引人们的注意力，并绕过目标导向的认知加工阶段，妨碍对这些对象的抑制控制，即使对这些对象的反应与当前目标相矛盾(Anderson et al., 2016)。因此，超重个体的习惯化反应可能与对奖赏线索的敏感性增强有关。

此外，系统性综述指出，高 BMI 个体或肥胖个体学习消极结果的能力减弱，表现为难以通过负强化进行工具学习以及在逆转学习中表现水平低(Weydmann et al., 2024)。以往研究发现肥胖个体难以根据结果反馈灵活的调整线索的预测价值(Zhang et al., 2014)，并且神经层面的研究也发现肥胖个体难以从消极预测错误中学习(Mathar et al., 2017)。这些研究发现表明肥胖个体对在奖赏价值变化或对学习消极结果的能力减弱，因而，当出现预期和反馈不一致时，也难以调整自己的行为，表现出习惯化反应。

值得注意的是，本研究的结果可能部分解释了先前对超重个体的目标导向和习惯控制研究中的不一致的结果。一方面，利用个体改变原有习惯化反应所需的额外的时间（RT 转换成本）作为习惯化反应的指标，相比于直接测量习惯化的外显反应（失误反应）是更加敏感的；另一方面，高时间压力也有利于探测习惯化反应。Hardwick 和同事(2019)发现时间压力能有效地揭示潜在习惯化反应。他们使用“强制响应”范式来限制被试的反应时间后发现，当这些被试被迫在较低的准备时间做出反应时，被试就会犯习惯化错误，即使他们习得了新的 S-R 关联。与目标导向运动的发现一致，即运动准备先于启动，并与启动分离(Haith, Pakpoor, & Krakauer 2016)，因而准备好的习惯化反应可能不会立即启动，一旦给出足够的时间，它可以被目标导向控制系统覆盖(Hardwick et al., 2019)。其他研究也发现，在高时间压力下，大量训练显著增加了人类的失误反应(Buabang et al., 2023)，但当被试被允许在充足的时间下做出反应时，训练对习惯化反应没有影响(de Wit et al., 2018; Pool et al., 2022)。因此，本研究的结果也验证了，通过 RT 转换成本和施加时间压力来考察人类目标导向和习惯控制系统的有效性，这将有助于未来学习与行为控制的双系统特征的研究。

由于，习惯是由情境线索直接激活的，并不受目标的影响(Wood et al., 2022)。因此，超重肥胖者的食物和金钱奖赏获取行为与目标脱离。尤其对于进食行为来说，即便吃饱了或者并不想吃某种食物时，超重肥胖者还会习惯化地获取它们。考虑到现代的生活环境中充满了食物线索，超重肥胖者目标导向与习惯行为控制系统之间的不平衡极有可能导致进食行为的不受控制的发生。因此，针对超重肥胖者食物习惯化反应必要进行深入的探究，包括探究在接近真实的进食情境下是习惯化反应是否仍会发生，以及这种习惯化反应背后的神经机制是什么。

4 研究二 超重肥胖者的食物习惯化反应的神经电生理研究

4.1 目的与假设

研究一探索了超重肥胖者与健康体重者在一般和食物奖赏条件下的习惯化反应，结果发现当采用时间压力下的工具学习任务时，超重肥胖者需要更多的时间来改变先前习得的行为，即表现出了更高的习惯化反应。为使实验更加贴近真实的食物选择情景，提高实验的生态效度，本研究利用经典的感觉特异性饱腹感范式降低测验阶段食物奖赏的价值。此外，由于行为和 ERP 的分析只能提供行为控制是否向习惯控制倾斜的证据，但无法探究超重肥胖者的食物习惯化反应是由于目标导向控制系统的下降，还是由于习惯控制系统的增强，或者两者都有。为此，本研究利用 Meier 等人（2020）的方法，采用 MVPA 解码分析学习阶段的脑电模式。

本研究假设：

（1）相比于健康体重组，超重肥胖组在经历真实情境食物贬值后，改变对贬值的食物线索反应的 RT 转换成本更大，即超重肥胖组存在食物习惯化反应；

（2）在工具学习任务的测验阶段，相比于健康体重组，超重肥胖组在贬值线索条件下 P1 和 P3 振幅升高；

（3）对 DSM 和工具学习任务的学习阶段进行 MVPA 解码分析，在学习阶段，相比于健康体重组，超重肥胖组的结果表征随着训练增多而显著下降，反应表征随着训练增多而显著上升。

4.2 方法

4.2.1 被试

在西南大学内通过广告或论坛随机招募女性大学生志愿者，共招募超重肥胖组和健康体重组各 30 人，先前均未参加过相似实验。工具学习任务中，2 名被试因为未能理解任务而被剔除，最终共 58 名被试被纳入数据分析，其中超重肥胖组 29 名，健康体重组 29 名。超重肥胖组被试的平均年龄为（ $M=20.207$, $SD=1.698$ ），BMI 范围为 25.22-33.06 kg/m^2 ，平均 BMI 为（ $M=27.162$, $SD=1.857$ ）健康体重组被试的平均年龄为（ $M=20.690$, $SD=1.583$ ），BMI 范围为 18.49-23.15 kg/m^2 ，平均 BMI 为（ $M=20.516$, $SD=1.211$ ）。所有被试视力或矫正视力正常，均无色盲或色弱，无进食障碍，无吸烟、酗酒或精神疾病史。本次实验通过西南大学心理学部伦理委员会的批准，实验前被试均签署了知情同意书。实验结束后，告知被试实验目的并给予相应报酬。

4.2.2 问卷材料

荷兰饮食行为问卷、进食障碍诊断量表、正负性情绪量表和 VAS 主观饥饿度评分同研究一。本研究中,荷兰饮食行为问卷的限制性饮食、情绪性饮食和外因性饮食分量表的 Cronbach's alpha 系数分别为 0.889、0.935 和 0.680; 正负性情绪量表的积极情绪和消极情绪问卷的 Cronbach's alpha 系数分别为 0.764 和 0.731。

食物评分。使用 VAS 分别评估其对甜味和咸味食物想吃和喜欢程度,采用 0 (一点都不)到 100 (非常)的评分。评分对象为咸味和甜味零食各两种,分别选择高甜味和咸味零食中评分更高的作为工具学习任务中的奖赏。

4.2.3 工具学习任务

采用改进后的工具学习任务(Luque et al., 2017; Luque et al., 2020),并利用感觉特异性饱腹感范式对强化学习中的食物奖赏进行贬值。

学习阶段。学习阶段的流程与研究一类似。被试扮演了太空交易员的角色,与来自两个部落(绿色外星部落和蓝色外星部落)的外星人交换图片(红色或黄色图片)来换取食物(甜味或咸味食物)。每个部落只喜欢特定的一种图片,且只交换一种食物或食物卡片(即甜味或咸味食物)。10 张任意类型的食物卡片可以兑换成 1 份任意的食物,因此食物卡片的价值比食物低很多。任务中,如果给了外星部落喜欢的图片,外星人会返回甜/咸味食物(高奖赏),而若给了不喜欢的图片,外星人则会返回甜/咸食物卡片(低奖赏)。被试被鼓励尽可能多的获得想吃的食物。并且,被试被告知在学习结束后的休息阶段,会随机兑换其中一种食物(甜/咸食物)给他。

在每次试验开始时,在屏幕中央呈现注视点,持续 200ms 到 300ms。然后,屏幕中央呈现一张图片。500ms 后,屏幕的两侧出现两个部落的外星人。被试被要求通过按下“F”键/“J”键来选择他们想要把图片给左/右边的外星人。代表反应选项的两类外星人的左/右位置是随机的。由于研究一发现,时间压力有利于观测到超重肥胖者的习惯性反应,因此该任务中沿用了研究一中对反应时的限制条件。一旦被试反应时间超出 500ms,屏幕上会提示“太慢,未获得奖赏”。而在及时反应后,屏幕上呈现 1000ms 礼盒,随后呈现 1000ms 所获得的食物(或者食物卡片)。

感觉特异性饱腹感任务。被试被告知他们有一个短暂的休息时间,此时他们会获得前一阶段的赢得的奖赏之一。在休息期间,他们有 15 分钟的时间,可以边看一个视频(风景的视频)边吃这些食物,直到自己不想吃这种食物为止。休息阶段结束后,被试需要回答一份包含虚假问题的调查问卷,内容包括:对视频中出现过的风景的再认和对刚刚吃过(虚假问题)的食物的口感、味道等进行评价(虚假问题)、对刚刚吃过的食物的想吃和喜欢程度,以及对没有吃的食物的想吃和喜欢程度。这一阶段的进食消耗的量以千卡来计算。

测验阶段。这一阶段的流程与研究一相同，除了为了防止新的学习，该阶段不再显示礼盒内的内容。这一阶段中，由于被试对一种食物不再不想吃（贬值食物），而仍然希望获得另一种食物（非贬值食物），因此，被试更可能改变在贬值食物线索下的反应，通过获得食物卡片的方式，来兑换另一种想要吃的食物。

学习阶段共包含 6 个 block，测验阶段包含 4 个 block。每个 block 有 24 个试次，包括 12 个甜味食物试次和 12 个咸味食物试次。

4.2.4 延迟样本匹配任务

延迟样本匹配任务（delayed-matching-to-sample task, DMS 任务）可以训练基于脑电图的分类器，用来分析反应选择和行为结果的神经表征(Meier et al., 2022)。任务包含四种不同的目标图片：蓝色外星人、绿色外星人、蓝色礼物盒和红色礼物盒。两类外星人和两类礼物盒除了在颜色上有明显区别以外，其他基本相同。各类目标图片 36 张，总共 144 张图片。每个试次从 144 张图片中随机选择图片作为目标，同一类别图片不会连续出现三次。在每次试验中，目标在电脑屏幕的中心显示 500ms。被试被要求在随后的 500ms 的延迟阶段记住它，在此期间屏幕上空屏。然后，出现一个探针刺激（目标和一个干扰物属于同一类别），被试必须通过按下“F”键/“J”键来报告他们之前看到是左/右侧的图片。在反应选择过程中，目标的位置（右和左）是随机的。为了避免工具学习任务改变 DMS 任务中刺激显著性，促使高奖赏相关的线索引起更大的注意，这个任务在被试完成工具学习任务前进行。任务流程见图 7。

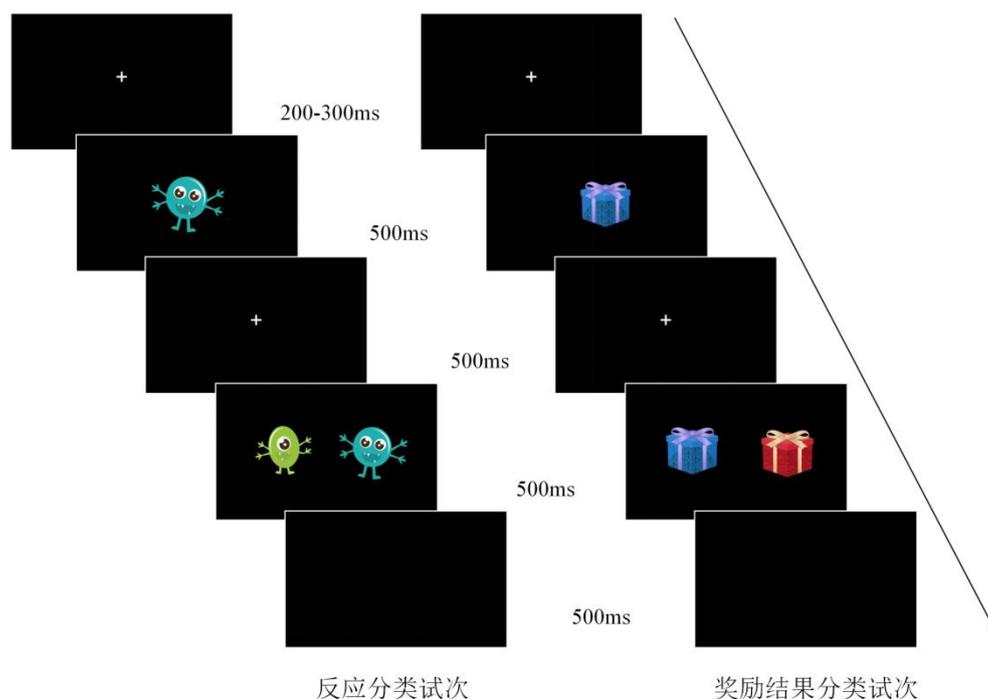


图 7 DMS 任务流程

4.2.5 实验过程

所有被试要求在实验开始前 4 小时不得进食，但可以饮水。当被试到达实验室后，告知他们该实验包含 1 个记忆任务和 1 个学习任务，中间会有一次 15 分钟的休息时间，期间可以一边看实验室准备的影片，一边吃食物。在被试签署知情同意后，首先，进行体重的测量。接着，完成对人口学变量问卷、正负情绪量表、VAS 主观饥饿度和对食物喜欢和想吃的程度进行评定，并要求被试在甜味和咸味食物中各选一种作为之后学习任务的奖赏。随后，完成延迟样本匹配任务和工具学习任务的学习阶段。学习阶段奖赏反馈采用先前选择的两种食物的图片，并告知被试这一阶段获得的奖赏等会儿会随机选择一种按比例兑换给他。在学习任务结束后，被试获得一大碗他在先前评分中想吃程度最高的食物，并被要求在接下来的 15 分钟内边看影片边吃食物，尽可能吃到自己完全不想吃为止。这一阶段后再对 VAS 主观饥饿度、食用的食物（贬值食物）和未食用的食物（非贬值食物）的喜欢和想要程度进行评分。最后，进行工具学习任务的测验阶段，这时被试同样被告知尽可能多的赢得你想吃的食物，并且所赢得的食物会在任务结束后供他们在实验室内继续享用。

4.2.6 数据分析

4.2.6.1 行为数据分析

采用独立样本 T 检验分析年龄、BMI、积极和消极情绪、进食前后的饥饿度、饱腹感、进食渴望程度、食物评分的组间差异。剔除被试内 RT 超出 $\pm 3SD$ 的反应试次（学习阶段共剔除 1.00%，测验阶段共剔除 1.61%）。为了缓解长时间任务导致的疲劳效应对实验结果的影响，本研究剔除了学习阶段最后两个 blocks 正确率低于 50%的条件（共剔除 0.70%）。采用 2 区组（超重肥胖组，健康体重组） \times 2 奖赏类型（甜味，咸味） \times 6 训练（block1, block2, block3, block4, block5, block6）的重复测量方差分析对学习阶段的最优反应率和反应时分析，比较两组在学习线索与食物奖赏的关系时的学习速度是否存在差异。采用独立样本 T 检验比较两组在学习正确率、RT 转换成本、失误反应上的差异。此外，本研究也分析了非贬值线索（非贬值食物对应的图片刺激）的反应时之差，即测验阶段的对非贬值线索反应的 RT 减去学习阶段的对该线索反应的 RT。用 Greenhouse-Geisser 方法调整 p 值的球形度。事后检验使用 Bonferroni 调整进行多重比较。数据分析采用 SPSS 23.0 进行。

4.2.6.2 脑电数据采集与预处理

脑电记录和分析。采用博睿康科技公司研发的 Neusen W 无线脑电采集系统收集脑电信号，采用设备自带的 64 导电极帽，其中 59 个电极的分布及对应脑区符合国际 10-20 系统(宋雨等, 2024)。同时记录左右眼眶外侧记录分别水平眼电（HEOL 和 HEOR），左眼上下部记录垂直眼电（VEOL 和 VEOU）。设备采样率为 1000 Hz，在整个记录过程中，电极阻抗保持在 5k Ω 以下。

采用 MATLAB R2020、EEGLAB2021.1 和 MVPA-Light 工具包进行脑电数据的分析。高通和低通滤波分别为 0.5Hz 和 30 Hz，并以 250 Hz 的频率重新采样。采用全脑平均的方式进行重参考。检测坏通道并对坏通道进行插值（使用默认的球形插值方法）。应用独立成分分析（ICA）对伪迹进行校正。对 DMS 和工具学习任务分别提取的两个阶段时间窗口。在 DMS 任务中，以刺激出现时间为零点提取 1200ms（刺激呈现前 200ms，刺激呈现后 1000ms）的分段，并以刺激出现前的 200ms 的作为基线进行基线校正。在工具学习任务中，以图片刺激出现时间为零点提取 700ms（图片刺激呈现前 200ms，图片刺激呈现后 500ms）的分段，并以图片刺激出现前的 200ms 的作为基线进行基线校正。然后，进行伪迹排除，排除在任意时间点上电压值超过 $\pm 100 \mu V$ 的分段。一旦一个被试有超过 40% 的分段被排除，该被试的数据将被排除。最后，由于 2 名被试的测验阶段的脑电数据不完整，强化学习的测验阶段的 ERP 分析中最终共 56 名被试被纳入最终的数据分析，其中超重肥胖组 29 名，健康体重组 27 名，其中平均有 1.3%（SD = 0.031）的试次含有伪迹。DMS 任务和工具学习任务的学习阶段纳入后续 MVPA 分析的共有 54 名被试，其中 DMS 任务平均有 0.93%（SD = 0.03）的试次含有伪迹，学习阶段平均有 0.58%（SD = 0.02）的试次含有伪迹。

4.2.6.3 ERP 分析

参考前人的研究，将 P1 的时间窗定义为目标出现后的 75-200ms，P3 的时间窗定义为目标出现后的 380-440ms。由于所有刺激都集中呈现，所以仅选取枕部中线电极 Oz(Luque et al., 2017; Meier et al., 2022; Smith et al., 2003)。因此，对 P1 采用采用 2 区组（超重肥胖组，健康体重组） \times 2 反应类型（贬值刺激，非贬值刺激），对 P3 采用 2 区组（超重肥胖组，健康体重组） \times 2 反应类型（贬值刺激，非贬值刺激） \times 7 电极位置（Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz）的重复测量方差分析。用 Greenhouse-Geisser 方法调整 p 值的球形度。事后检验使用 Bonferroni 调整进行多重比较。

4.2.6.4 MVPA 分析

为了探究超重肥胖者的习惯化反应究竟是源于目标导向控制的减弱，还是习惯控制的增强，抑或者两者都有。采用 Meier 等人(2022)的方法，利用一种基于 ERP 的解码方法来探索超重肥胖者对反应和结果表征的改变。该方法利用一个独立的数据集（DMS 任务），利用 MVPA 的方法，分别训练两个独立的支持向量机（support vector machines, SVM）分类器，以区分在工具学习任务中作为反应的类别（蓝色外星人和绿色外星人）和作为奖赏结果的类别（蓝色盒子和绿色礼物盒）。然后，这两个分类器被用来解码在整个工具学习任务中反应和结果表征的参与程度。

MVPA 训练。使用 MVPA-Light 工具包(Treder, 2020)进行 MVPA 分析，分类器在被试水平上进行训练，以所有的 ERP 通道为特征，采用线性的 SVM。依照 Meier 等人（2022）的方法，对 DMS 任务进行了两个独立的分析：（1）区分蓝色外星人和绿色外星人（2）区分蓝色盒子和绿色礼物盒）。为了确定每个被试解码的最佳时间窗口，采用一个 100ms，步长为

10ms 的滑动窗口，对 DMS 任务刺激呈现后到选择屏前的 1000ms 进行分析。获得的最好解码性能的时间窗口作为该被试的分类器，运用于后续的解码工具学习任务中的反应和结果表征。分类器的泛化采用 10 折交叉验证来检验分类器的性能。如果分类器的性能仍然显著高于机会水平（chance level），则表明脑电图模式包含特定于类的信息，并且可以从 ERP 数据能够可靠地解码该类别(Murphy et al., 2011)。以往研究指出在一个简单的两分类任务中，机会水平不是一定的 50%。因此，利用小样本量调整的 Wald 区间计算了这个区间，得到分类器的机会水平阈值为 61.42%(Agresti & Caffo, 2000; Müller-Putz et al., 2008)。在 DMS 任务中分类器准确率低于机会水平的被试不被纳入后续分析。在蓝色和红色礼物盒的分类过程中，5 名被试的分类器准确率没有达到机会水平；在蓝色和绿色外星人的分类过程中，所有被试的最高表现均达到机会水平。因此，最终用于结果表征（基于蓝色/红色礼物盒的 SVM 分类器）和反应表征（基于蓝色/绿色外星人的 SVM 分类器）的分析样本分别为 49 人（超重肥胖组 27 名，健康体重组 22 名）和 54 人（超重肥胖组 28 名，健康体重组 26 名）。

MVPA 解码。将 DMS 任务中训练的蓝色/红色礼物盒的 SVM 分类器和蓝色/绿色外星人的 SVM 分类器应用在工具学习任务的学习阶段，用以考察在工具学习任务的学习阶段的反应和结果表征。分别利用 DMS 任务得到的两类分类器，对工具学习任务的学习阶段的线索屏的 500ms 进行解码，使用一个重叠的滑动窗口，时间平均为 100ms，步长为 10ms，得到的最大的分类性能表明刺激呈现时奖赏结果和反应表征的强度。目标导向控制的特征是基于行为与结果的关联，这会导致刺激呈现时个体会对预期奖赏结果进行表征，因而区分奖赏结果（蓝色盒子和绿色礼物盒）类别的分类器在工具学习任务中性能越好，表明个体的结果表征的强度越强，行为越倾向于目标导向控制；而习惯控制基于刺激-反应的联结，对奖赏结果的变化不敏感，因而区分反应（蓝色外星人和绿色外星人）类别的分类器性能越好，表明个体的反应表征的强度越强，行为越倾向于习惯控制。随着训练次数的增加，目标导向行为会向习惯行为过渡(Dolan & Dayan, 2013)。

对学习阶段分为前 3 个 block 和后 3 个 block 分别进行解码。采用 2 区组（超重肥胖组，健康体重组） \times 2 训练程度（前期，后期）的重复测量方差分析。采用斯皮尔曼相关分析考察 8 个指标与测验阶段行为指标 RT 转换成本之间的关系，8 个指标分别为：4 个前后期分类器准确率、训练前后期结果表征强度的变化（前期蓝色/红色礼物盒的 SVM 分类器最大的分类性能-后期蓝色/红色礼物盒的 SVM 分类器最大的分类性能）、反应表征强度的变化（前期蓝色/绿色外星人的 SVM 分类器最大的分类性能-后期蓝色/绿色外星人的 SVM 分类器最大的分类性能）。重复测量方差分析和相关分析采用 SPSS 23.0 进行。

4.3 结果

4.3.1 描述性统计

两组被试的描述性统计结果如表 7 所示, 超重肥胖组的 BMI 显著高于健康体重组 ($t_{(1,56)}=16.143, p < 0.001, d = 4.240$), 进食后饥饿程度上显著高于健康体重组 ($t_{(1,56)}=2.326, p=0.024, d = 0.611$), 超重肥胖组的限制性饮食程度显著高于健康体重组 ($t_{(1,56)}=2.105, p=0.004, d = 0.552$), 而在年龄、情绪和进食前后对两类食物的喜欢和想吃等得分上没有显著差异 ($ps > 0.05$)。

表 7 超重肥胖组与健康体重组的差异检验 (M±SD)

变量	超重肥胖组 (n=29)	健康体重组 (n=29)	t	p
人口学变量和饮食行为				
age	20.207±1.698	20.690±1.583	-1.120	0.268
BMI***	27.162±1.857	20.516±1.211	16.143	<0.001
限制性饮食*	3.310±0.785	2.897±0.710	2.105	0.040
情绪性饮食	3.042±0.848	2.785±0.822	1.173	0.246
外因性饮食	3.845±0.457	3.876±0.328	-0.297	0.768
进食前				
饥饿程度	66.655±16.380	61.414±23.242	0.993	0.325
饱腹感	23.207±19.104	19.138±21.430	0.763	0.449
进食渴望	65.207±20.972	65.966±23.760	-0.129	0.898
想吃甜味食物的程度	54.379±24.255	54.000±23.286	0.061	0.952
想吃咸味食物的程度	67.621±24.094	57.897±25.038	1.507	0.137
喜欢甜味食物的程度	67.483±24.732	57.69±23.126	1.558	0.125
喜欢咸味食物的程度	73.724±22.163	64.414±22.784	1.577	0.120
积极情绪	2.531±0.621	2.355±0.555	1.137	0.260
消极情绪	2.676±0.667	2.652±0.473	0.159	0.874
进食后				
进食量 (Cal)	323.362±311.575	278.935±289.565	0.562	0.576
饥饿程度*	29.172±24.795	15.759±18.704	2.326	0.024
饱腹感	70.379±17.923	70.310±26.954	0.011	0.991
进食渴望	35.241±24.361	23.966±27.460	1.654	0.104
想吃贬值食物的程度	9.035±17.359	8.069±16.763	0.215	0.830
想吃非贬值食物的程度	46.897±22.888	44.828±28.145	0.307	0.760
喜欢贬值食物的程度	33.000±23.014	30.241±24.306	0.444	0.659
喜欢非贬值食物的程度	52.759±20.632	52.621±23.743	0.024	0.981

注: 贬值食物, 在进食阶段吃到不想吃的甜味/咸味食物; 非贬值食物, 实验中没有吃的咸味/甜味食物; * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ 。

4.3.2 行为结果

4.3.2.1 学习阶段

为了比较超重肥胖组和健康体重组在学习两种食物对应的反应上是否存在差异，采用 2 区组（超重肥胖组，健康体重组） \times 2 奖赏类型（甜味，咸味） \times 6 训练（block1, block2, block3, block4, block5, block6）的重复测量方差分析对学习阶段的最优反应率和反应时分析。

结果发现，对于最优反应率，训练的主效应显著（ $F_{(5, 280)} = 87.127, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.609$ ），结果见图 8。事后检验发现，block1 的最优反应率显著低于其他 block（ $p_s < 0.001$ ），block2 的最优反应率显著小于 block4、block5 和 block6（分别为 $p = 0.004, p < 0.001, p < 0.001$ ），block3 的最优反应率显著小于 block5 和 block6（分别为 $p = 0.007, p < 0.002$ ）。对于反应时，训练的主效应显著（ $F_{(5, 275)} = 9.482, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.147$ ），结果见图 9。事后检验发现，block1 的反应时显著低于 block2、block3、block5 和 block6（分别为 $p = 0.013, p = 0.008, p = 0.013, p = 0.001$ ）。此外，其他效应均不显著（ $p_s > 0.200$ ）。这一结果表明两组被试均习得了食物线索-反应-结果的关系，且习得的速度和准确率没有显著差异。

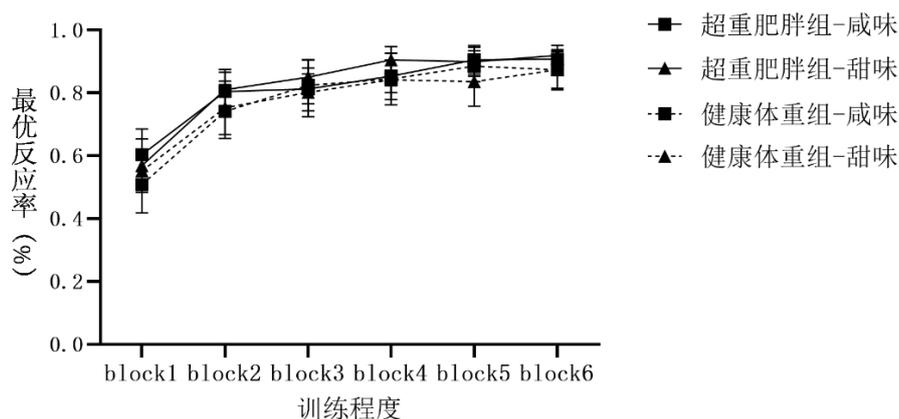


图 8 两组在学习阶段最优反应率的变化

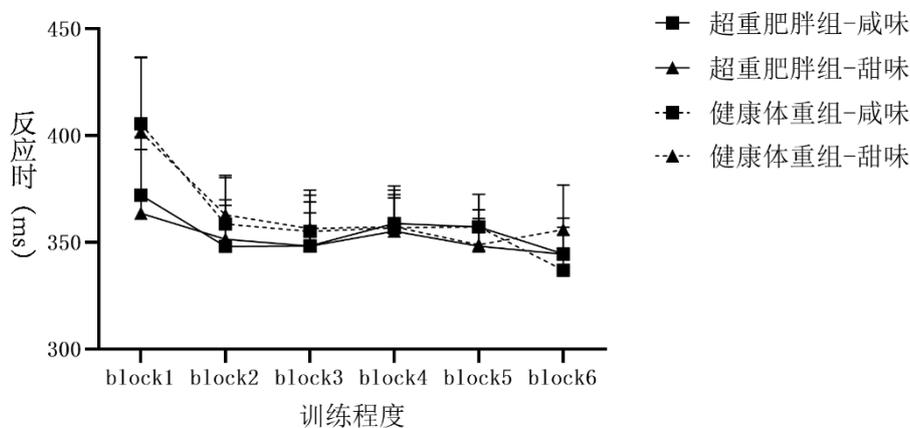


图 9 两组在学习阶段反应时的变化

注：健康体重组中，有 1 名被试在学习阶段的 block1 中未获得咸味食物，因此未纳入学习阶段 RT 差异检验。

4.3.2.2 测验阶段

独立样本 T 检验发现,两组在 RT 转换成本存显著差异($t_{(1,56)} = -2.397, p = 0.020, d = 0.629$),具体表现为超重肥胖组的 RT 转换成本显著高于健康体重组被试,结果见图 10(左)。两组的对非贬值线索反应时之差也存显著差异($t_{(1,56)} = -2.838, p = 0.006, d = 0.745$),即超重肥胖组的对非贬值线索反应时之差同样显著高于健康体重组,结果见图 10(右)。另外,两组在失误反应上没有显著差异($t_{(1,56)} = -0.419, p = 0.667, d = -0.110$)。描述统计结果见表 8。

表 8 超重肥胖组与健康体重组习惯化反应的差异检验 (M±SD)

	超重肥胖组 (n=29)	健康体重组 (n=29)	t	p
RT 转换成本*	23.222±39.933	0.492±31.839	2.397	0.020
非贬值线索 反应时之差**	-3.295±36.250	-27.275±27.499	2.838	0.006
失误反应	2.966±2.968	3.267±2.492	-0.419	0.677

注: 非贬值线索反应时之差=测验阶段非贬值线索反应时-学习阶段贬值线索反应时; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

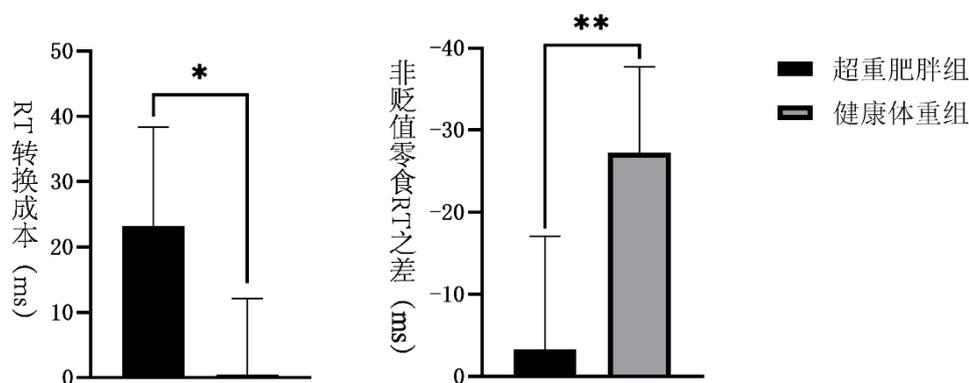


图 10 RT 转换成本和非贬值线索反应时之差的组间差异

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

4.3.2.3 操作性检验

2 时间(进食前, 进食后)×2 食物类型(贬值, 非贬值)的方差分析结果显示,时间与类型的交互作用显著($F_{(1,57)} = 83.143, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.589$),时间的主效应显著($F_{(1,57)} = 118.619, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.672$),食物类型的主效应显著($F_{(1,57)} = 21.375, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.269$)进一步简单效应分析发现,进食后被试对两类食物想吃程度均降低(贬值食物, $F_{(1,57)} = 220.291, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.792$; 非贬值食物, $F_{(1,57)} = 4.807, p = 0.032, \eta_p^2 = 0.077$);此外,进食前,被试对非贬值食物的想吃程度显著高于非贬值食物($F_{(1,57)} = 4.205, p = 0.040, \eta_p^2 = 0.070$),而在进食后,被试对贬值食物的想吃程度显著低于对非贬值食物的想吃程度($F_{(1,57)} = 102.552, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.639$)。表明进食操作显著降低了被试对最初想吃食物的渴望程度,食物贬值的操作有效。

4.3.3 ERP 结果

P1, P3 的平均振幅和地形图分别呈现在图 11 和图 12 中。

P1 分析。选取刺激后 70-140ms 进行分析。方差分析结果显示, 2 区组(超重肥胖组, 健康体重组) × 2 反应类型(贬值刺激, 非贬值刺激) 交互作用显著 ($F_{(1,54)} = 4.399, p = 0.041, \eta_p^2 = 0.075$), 区组的主效应显著 ($F_{(1,54)} = 10.187, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.159$)。进一步进行简单效应分析, 结果表明健康体重组的 P1 振幅, 在贬值线索条件下显著下降 ($F_{(1,54)} = 6.668, p = 0.013, \eta_p^2 = 0.110$); 而超重肥胖组的 P1 振幅在两种条件下没有差异。同时, 简单效应分析也发现在非贬值 ($F_{(1,54)} = 6.918, p = 0.011, \eta_p^2 = 0.114$) 和贬值线索条件 ($F_{(1,54)} = 11.935, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.181$) 下, 超重肥胖组的 P1 振幅均比健康体重组的大。

P3 分析。选取刺激后 380-440ms 进行分析。方差分析结果显示, 2 区组(超重肥胖组, 健康体重组) × 2 反应类型(贬值刺激, 非贬值刺激) × 7 电极位置(Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz) 三阶交互作用不显著 ($F_{(6,324)} = 0.967, p = 0.394, \eta_p^2 = 0.018$), 但依照假设对其简单效应进行探索分析发现, 在 Pz 位置, 健康体重组中非贬值线索 P3 振幅有下降的趋势 ($F_{(1,54)} = 3.161, p = 0.081, \eta_p^2 = 0.055$), 而超重肥胖组中无这种趋势 ($F_{(1,54)} = 1.026, p = 0.316, \eta_p^2 = 0.019$); 在 Cz 位置, 非贬值线索组间差异不显著 ($F_{(1,54)} = 3.320, p = 0.074, \eta_p^2 = 0.058$); 而在贬值线索条件下超重肥胖组的 P3 振幅显著小于健康体重组 ($F_{(1,54)} = 7.115, p = 0.010, \eta_p^2 = 0.116$); 在 Oz 位置, 非贬值线索组间差异不显著 ($F_{(1,54)} = 1.869, p = 0.177, \eta_p^2 = 0.033$); 而在贬值线索条件下超重肥胖组的 P3 振幅显著大于健康体重组 ($F_{(1,54)} = 5.569, p = 0.022, \eta_p^2 = 0.093$)。区组 × 电极位置主效应显著 ($F_{(6,324)} = 4.504, p = 0.012, \eta_p^2 = 0.770$)。简单效应分析发现, 在 Fz、FCz 和 Cz 位置超重肥胖组的 P3 振幅显著小于健康体重组(分别为 $F_{(1,54)} = 5.051, p = 0.029, \eta_p^2 = 0.086$; $F_{(1,54)} = 6.709, p = 0.012, \eta_p^2 = 0.111$; $F_{(1,54)} = 5.810, p = 0.019, \eta_p^2 = 0.097$), 而在 POz 位置超重肥胖组的 P3 振幅显著大于健康体重组 ($F_{(1,54)} = 6.218, p = 0.016, \eta_p^2 = 0.103$)。电极位置主效应显著 ($F_{(6,324)} = 39.052, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.420$)。事后检验发现, P3 成分振幅的脑区的大小顺序为: FCz < Fz < FPz < Cz < Oz < POz < Pz。

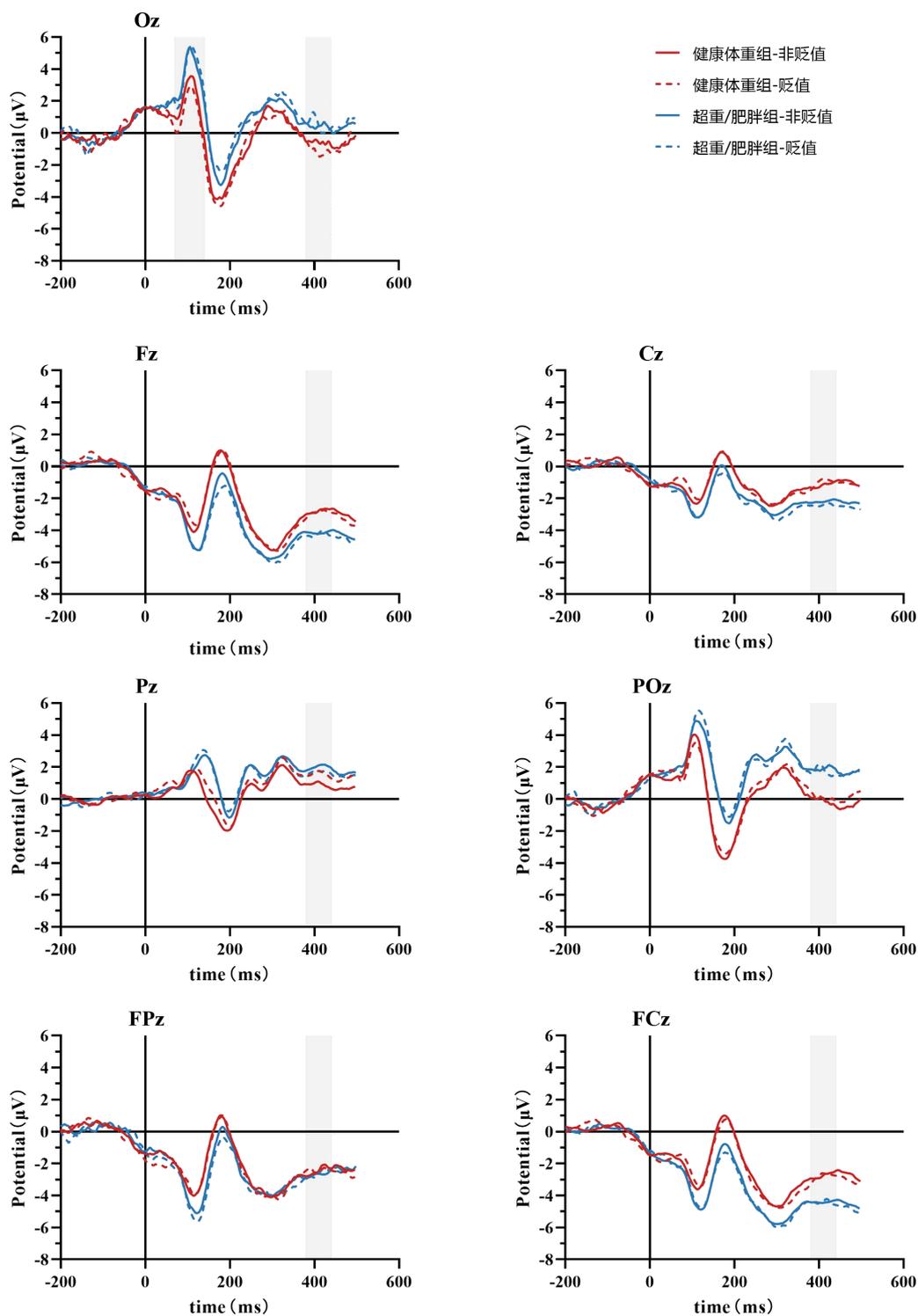


图 11 超重肥胖组和健康体重组的 ERP 波形图

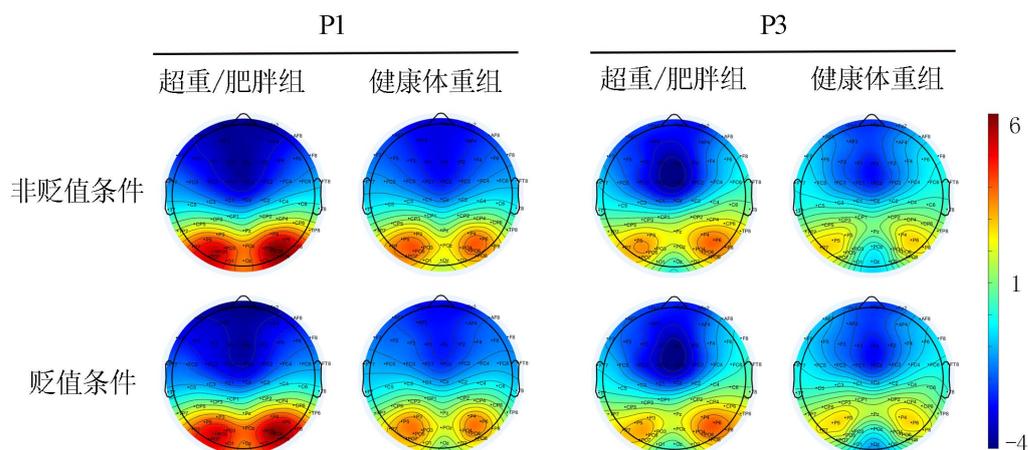


图 12 超重肥胖组和健康体重组的 ERP 的地形图

4.3.4 MVPA 结果

分类器准确率的描述性统计见表 9。

表 9 各任务的分类准确率 (M±SD)

	超重肥胖组	健康体重组
DMS 任务		
DMS_结果表征	0.686±0.064	0.677±0.041
DMS_反应表征	0.706±0.040	0.716±0.011
工具学习任务的学习阶段		
前期_结果表征	0.589±0.042	0.566±0.065
后期_结果表征	0.548±0.071	0.593±0.082
前期_反应表征	0.562±0.074	0.581±0.055
后期_反应表征	0.567±0.076	0.564±0.061

注：分类准确率用曲线下面积 (the area under the curve, AUC) 评估。纳入结果表征分析的被试 49 人 (超重肥胖组 22 名, 健康体重组 27 名), 纳入反应表征分析的被试共 54 人 (超重肥胖组 26 名, 健康体重组 28 名)。

对结果表征进行重复测量方差分析发现, 2 区组 (超重肥胖组, 健康体重组) × 2 训练程度 (前期, 后期) 的交互作用显著 ($F_{(1, 47)} = 8.521, p=0.005, \eta_p^2 = 0.153$), 见图 13。进一步简单效应分析发现, 超重肥胖组训练后期的结果表征显著下降 ($F_{(1, 47)} = 5.536, p = 0.023, \eta_p^2 = 0.105$), 而健康体重组前后期的结果表征差异不显著 ($F_{(1, 47)} = 3.062, p=0.087, \eta_p^2 = 0.061$)。同时, 简单效应也分析发现, 在训练后期, 区组间的结果表征差异显著 ($F_{(1, 47)} = 5.127, p = 0.048, \eta_p^2 = 0.081$), 表现为超重肥胖组小于健康体重组。此外, 区组的主效应不显著 ($F_{(1, 47)} = 0.491, p = 0.487, \eta_p^2 = 0.010$), 训练程度的主效应不显著 ($F_{(1, 47)} = 0.330, p = 0.569, \eta_p^2 = 0.007$)。

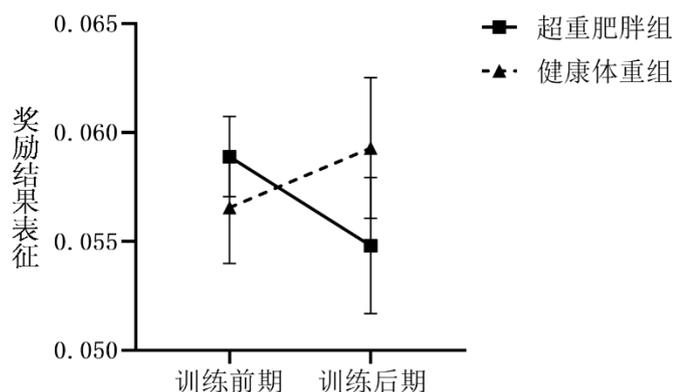


图 13 两组在学习前后期的结果表征程度

对反应表征进行重复测量方差分析发现, 2 区组 (超重肥胖组, 健康体重组) \times 2 训练程度 (前期, 后期) 的交互作用不显著 ($F_{(1, 52)} = 0.770, p = 0.384, \eta_p^2 = 0.015$)。区组的主效应不显著 ($F_{(1, 52)} = 0.365, p = 0.549, \eta_p^2 = 0.007$) , 训练程度的主效应不显著 ($F_{(1, 52)} = 0.237, p = 0.628, \eta_p^2 = 0.005$) 。

4.3.5 行为结果与 ERP 和 MVPA 结果的相关

采用斯皮尔曼相关分析考察测验阶段行为指标 RT 转换成本与 Oz 位置 P1 在两种条件 (贬值, 非贬值) 下的差异波、训练前后期分类器准确率、前后期结果表征强度的变化、前后期反应表征强度的变化。结果显示, 学习后期结果分类器准确性与 RT 转换成本呈显著负数相关 ($r = -0.343, p = 0.016$) 与 P1 差异波呈显著正相关 ($r = 0.348, p = 0.009$) , 前后期反应表征强度的变化与 RT 转换成本的负相关边缘显著 ($r = -0.267, p = 0.051$)。Oz 位置 P1 差异波与 Oz 位置 P3 差异波呈显著正相关 ($r = 0.580, p < 0.001$) , Oz 位置 P3 差异波与学习后期结果分类器准确性显著正相关 ($r = 0.292, p < 0.044$)。结果见表 10。

表 10 奖赏结果/反应表征指标的行为 RT 转换成本的相关统计分析

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	-0.08	1								
3	-0.03	0.038	1							
4	0.01	-0.04	0.83**	1						
5	0.01	0.58***	0.04	-0.04	1					
6	-0.10	0.22	0.00	-0.02	0.10	1				
7	-0.35*	0.37**	-0.18	-0.18	0.29*	0.13	1			
8	-0.19	0.01	0.02	0.01	0.05	0.05	0.08	1		
9	0.10	-0.02	-0.06	-0.10	0.06	-0.05	-0.17	0.17	1	
10	0.20	-0.19	0.16	0.10	-0.14	0.48**	-0.77**	-0.05	0.16	1
11	-0.27	0.02	0.05	0.07	-0.02	0.02	0.13	0.57**	-0.63**	-0.09

注：1：RT 转换成本，2：Oz 位置 P1 差异波，3：非贬值线索 POz 位置 P3b，4：贬值线索 POz 位置 P3b，5：Oz 位置 P3 差异波，6：前期结果分类器准确性，7：学习后期结果分类器准确性，8：前期反应分类器准确性，9：后期反应分类器准确性，10：前后期结果表征强度变化，11：前后期反应表征强度的变化；* $p < 0.05$ ，** $p < 0.01$ ，*** $p < 0.001$ 。

4.4 讨论

本研究显示超重肥胖组和健康体重组在饥饿度、进食渴望、积极情绪、消极情绪、情绪性饮食和外因性饮食上均没有显著差异，说明本研究的结果不受这些变量的影响。行为结果显示，相比健康体重组，超重肥胖组对贬值食物的 RT 转换成本更高，表明即使超重肥胖组对一种食物已经吃到不想吃了，仍旧会表现出对这种食物的习惯化反应。对感觉特异性饱腹感操纵进行操作性检验得到，进食前被试对贬值食物的想吃程度显著高于非贬值食物，而在进食后对贬值食物的想吃程度显著低于非贬值食物，表明实验操纵有效。

脑电数据分析显示，在工具学习任务的测验阶段，相比非贬值线索，健康体重组在观看贬值线索时的 P1 振幅显著下降，而超重肥胖组的 P1 振幅无显著变化。另外，P3 振幅的结果显示，在 Oz 位置，非贬值线索条件下组间差异不显著，而在贬值线索条件下超重肥胖组的 P3 振幅显著大于健康体重组。超重肥胖组的 P3 振幅在 Fz、FCz 和 Cz 位置显著减小，而 POz 位置的 P3 振幅增大。鉴于 380-400ms 内发现的 P3 在 POz、Oz 和 Pz 位置的振幅更大，因此该研究发现的 P3 可能为 P3b(Polich, 2007; Polich & Criado, 2006)。对工具学习任务的学习阶段进行 MVPA 解码分析的结果显示，超重肥胖组在学习后期的结果表征显著减少，而健康体重组前后期结果表征没有显著差异，即经过一段时间的学习后超重肥胖组在获取食物时的目标导向控制减弱。

行为和脑电数据分析的相关结果显示, RT 转换成本与学习后期结果分类器准确性呈显著负相关, 与前后期反应表征强度的变化有负相关的趋势。另外, 也发现学习后期结果分类器准确性与 Oz 位置 P1 差异波呈显著正相关。

与研究一的结果一致, 本研究采用了感觉特异性饱腹感的操纵, 模拟日常的进食情景, 同样发现超重肥胖者在面对已经吃到不想吃的食物奖赏时仍然表现出较高的习惯化反应。虽然超重肥胖组的限制性饮食程度显著高于健康体重组, 但由于研究一发现在限制性饮食程度无差异的两组被试中, 超重肥胖组的习惯化反应高于健康体重组, 因而该研究的组间差异仍可以反应与超重肥胖相关的特点。此外, 本研究也发现在测验阶段非贬值线索反应时之差(测验阶段非贬值线索反应时 - 学习阶段非贬值线索反应时)也存在组间差异, 即尽管在测验阶段两组被试对非贬值线索的反应速度都加快了, 但是超重肥胖组反应时的减少量显著小于健康体重组反应时的减少量, 即当超重肥胖者被要求改变先前习得 S-R 关联时, 他们对另外的 S-R 关联的保持也存在困难, 这可能表明超重肥胖者在调整他们的行为以适应奖赏条件变化时面临更大的认知负担。这可能反映了认知控制和决策制定能力的差异。

枕部 P1 是一个早期的视觉事件相关电位(ERP)成分, 由纹状体外视觉皮层的活动产生, 并与刺激显著性有关(Heinze et al., 1994; Hillyard et al., 1998)。以往研究表明, 无意义刺激与高奖赏匹配后, 奖赏显著性会被分配给匹配的刺激, 从而该刺激的显著性升高(Flagel et al., 2011; Kahnt et al., 2014), 使得原本无意义的刺激更能吸引注意(Anderson, 2016; Qu, Hillyard, & Ding, 2017), 并且即使该刺激后不再伴随奖赏也依旧会引起更大的 P1 波幅(Hickey et al., 2010; MacLean & Giesbrecht, 2015), 这表明与奖赏关联的历史(reward-related history)会影响对注意力的早期选择过程。视觉皮层利用习惯学习系统提供的信息来增加个体对高奖赏刺激的敏感性, 从而在注意层面提高了这些刺激的优先级(Anderson, 2016; MacLean & Giesbrecht, 2015; Pearson et al., 2016)。另外一项采用工具学习任务的研究同样发现, 贬值奖赏结果后, 与奖赏相关的 P1 效应仍然存在, 表明 P1 可能反应了视觉皮层中类似习惯的神经活动(Luque et al., 2017)。因而, 超重肥胖者对贬值线索仍具有较高的 P1 振幅, 可能表明尽管超重肥胖者不再想要线索后的食物奖赏, 但该线索仍能有效地捕获他们的注意。

通常认为, P3 与工作记忆、注意力资源分配或当前任务所需的认知资源数量有关(Daffner et al., 2011; Polich, 2007; Vilà-Balló et al., 2018)。先前研究表明, 在低工作记忆负载的条件下, 低任务表现者比高任务表现者的 P3 振幅更高, 可能反应任务表现差的个体在执行任务中使用更多的资源(Daffner et al., 2011)。此外, 同样采用工具学习任务的研究发现, 贬值条件下的 P3b 显著高于非贬值条件, 可能反应在贬值条件下需要更多工作记忆资源来检索贬值刺激更新后的奖赏价值, 或需要更大的认知资源来抑制先前习得的贬值刺激与奖赏结果价值的关系, 即反应了目标导向控制的过程(Luque et al., 2017)。虽然, 本研究中未发现区组与反应类型的交互作用, 但是, 本研究中无论是贬值还是非贬值条件, 超重肥胖组在 POz 位置的 P3b 均显著高于健康体重组, 这也可以用工作记忆等执行功能的缺陷来解释。研究表明, 超重和肥胖者都

存在工作记忆和抑制控制能力的减退(Liu, et al., 2019, 2020; Song et al., 2022; Yang et al., 2018)。超重肥胖组更大的 P3b, 可能表明在测验阶段, 不仅需要更多工作记忆资源来检索贬值刺激更新后的奖赏价值, 或需要更多的认知资源来抑制先前习得的贬值刺激与奖赏结果价值的关系, 也需要更多工作记忆资源来维持先前习得的非贬值刺激与奖赏结果价值的关系, 这一结果与行为发现是一致的。因而, 这一发现可能表明, 在超重肥胖者的目标导向控制中更新和维持奖赏结果价值的过程的存在缺陷。

P3b 振幅的升高也可能用 S-R 联结的重新激活假说来解释(Molinero et al., 2021; Verleger, 2020)。研究者采用奖赏学习任务发现, 相比刺激后按键左右随机的条件(弱 S-R 联结条件), 刺激后按键左右固定的条件(强 S-R 联结条件)下 P3b 更大, 这可能表明在强 S-R 联结条件下, 为了更快、更准确地做出反应, 刺激的呈现重新激活了已经学习过的 S-R 联结(Molinero et al., 2021)。因此, 超重肥胖组的 P3b 升高也可能反应了他们习得的 S-R 联结更强, 即行为受习惯的控制, 而脱离奖赏结果价值。然而, 支持这一假说的研究仅考察了工具学习任务的学习阶段, 并未对贬值条件进行进一步的分析, 因而贬值条件下 P3b 振幅的升高是否是源于 S-R 联结的重新激活还需要进一步的研究。

另一方面, 以往研究表明, Pz 位置 P3b 和 Oz 位置 P3 的振幅可能分别受两种过程调节, Pz 位置 P3b 的振幅在强 S-R 联结的条件和高奖赏结果相关刺激条件下升高, 而 Oz 位置 P3 的振幅仅在高奖赏结果相关刺激条件下更高(Molinero et al., 2021), 因而升高的枕部 P3b 振幅可能与刺激的高知觉和情绪显著性密切相关(R.K. Miller & Martin, 2020; Molinero et al., 2021)。在本研究中, 本研究发现相比于健康体重组, 超重肥胖者的 P3b 振幅显著更高, 这可能表明与食物奖赏相关的线索在这一人群中具有更高的奖赏价值。这与之前的发现一致, 即超重肥胖者对预测食物奖赏的线索显示出更高的敏感性(Stice & Burger, 2019)。而超重肥胖组在贬值刺激下 Oz 位置 P3 振幅也显著高于健康体重组, 可能反应了食物相关刺激对于超重肥胖组的知觉显著性或情绪显著性更高, 并且在刺激关联结果贬值后依然保持较高的知觉显著性或情绪显著性, 即对刺激的结果价值变化不敏感。相关分析的结果也发现, Oz 位置 P1 差异波与 Oz 位置 P3 差异波呈显著正相关, 证明 Oz 位置的 P1 和 P3 很可能反应类似的心理过程。

MVPA 可以识别传统的单变量分析中无法检测到的复杂的神经活动模式(Grootswagers et al., 2017), 与传统分析相比 MVPA 能够提供对大脑如何整体性处理信息的更深入地理解。目前的行为任务和 ERP 成分分析只能分析是否存在目标导向和习惯控制系统的不平衡, 以及对这种不平衡的原因进行推测, 而不能直观地测量出究竟这种不平衡是源于目标导向控制的减弱, 还是习惯控制的增强(P. Watson & de Wit, 2018)。MVPA 的方法在一定程度上可以克服这一局限性。研究利用 SVM 方法, 先学习个体在表征结果(反应目标导向控制)和表征行为(反应习惯控制)时的神经活动模式, 即表征结果分类器和反应分类器。然后将其应用到工具学习任务的学习阶段, 对这一阶段的神经活动模式进行分析。若分类器效果好, 则此时的神经

活动模式与分类器对应的模式相似，即个体此时的心理表征更倾向于分类器所对应的模式 (Meier et al., 2022)。据此，在神经表征层面分离了两种控制。

在利用 MVPA 分析工具学习任务的学习阶段时，发现超重肥胖组训练后期的结果表征显著下降，这一点在健康体重组并不显著。这一结果表明，超重肥胖者在工具学习任务后期更多地采用习得的 S-R 关联来指导行为反应，而较少地关注奖赏结果。这也与后续地相关分析结果一致，即后期结果分类器准确性与 RT 转换成本呈显著负数相关与 Oz 位置 P1 和 P3 差异波呈显著正相关，表明后期结果分类器准确性能够预测测验阶段的习惯化反应大小，并与测验阶段对贬值线索的过高的注意有关。这可能与超重肥胖者与目标导向控制系统的相关脑区改变有关。目标导向控制系统主要与背内侧纹状体、腹内侧前额叶、眶额叶、前扣带回皮层等脑区密切相关(董晨杰 等, 2018)。研究表明，进食奶昔时的背内侧纹状体的激活降低与 BMI 和冲动性升高有关(Babbs et al., 2013)。另一项研究也发现，BMI 与背外侧纹状体和海马之间的功能连接增强，与多个执行控制相关的前额叶脑区的功能连接减弱有关(Zhao et al., 2021)，这些结果可能反映了超重肥胖者支持目标导向控制系统的脑区发生了改变。

此外，研究也发现，肥胖个体在反复观看食物图片后，伏隔区、杏仁体等参与奖赏处理的皮层下区域和参与抑制处理的皮层区随着食物图片的反复呈现表现出适应性减少的特征 (Ghobadi-Azbari et al., 2023)。这项研究表明，与观看中性图片相比，肥胖个体在多次观看食物图片时，与重要性评估和奖赏处理相关的脑区（包括内侧或外侧杏仁体、颞上回、伏隔核和内侧额叶回）的激活程度随观看次数增加而减少。特别是，在连续观看一系列食物图片的过程中，右侧杏仁体和右侧伏隔核的活跃度呈现先上升后下降的趋势，这反映了肥胖个体对食物图片的敏感性先是增强然后减弱，即呈现出适应性降低的特征。这一结果与 Burger 等人 (2014) 发现的反复暴露于奶昔下的尾状核激活程度降低与随后 BMI 增加之间的相关的研究相呼应。这些现象可能反映了一个习惯化的过程，即超重肥胖者对食物本身的反应越来越不敏感，致使进食行为不再受到当前食物吸引力或饥饿状态的调节。然而，Ghobadi-Azbari 等人 (2023) 的研究仅涉及 BMI 为 26-35kg/m² 的超重和肥胖群体，并未涉及健康体重人群，因此，尚未清楚健康体重人群是否在反复观看食物图片后也会出现相似的效应。

综上所述，这些发现共同指向了超重肥胖者在奖赏学习和决策过程中目标导向控制与习惯控制系统的失衡。这种缺陷可能与测验阶段对贬值线索的注意增加和学习后期目标导向控制系统的减弱有关，神经活动层面的改变影响了超重肥胖者对奖赏的感知、处理和反应。本研究结果不仅为理解肥胖背后的复杂神经机制提供了见解，也为设计针对改善这一群体习惯化反应的干预措施提供了理论支持。

5 研究三 超重肥胖者食物习惯化反应对半年后 BMI 的预测

5.1 目的与假设

研究二发现, 超重肥胖者在存在目标导向和习惯控制的不平衡, 这可能与测验阶段对贬值线索的注意增加以及学习阶段目标导向控制的减弱有关。为了探究这种不平衡是否能进一步的预测未来的体重增加, 本研究以研究二习惯化反应的行为与电生理特征作为预测指标, 即 RT 转换成本、Oz 位置 P1 差异波、贬值条件和非贬值条件 POz 位置 P3b、Oz 位置 P3 差异波、后期结果分类器准确性, 预测半年后被试的饮食行为和肥胖指数, 以此探讨食物习惯化反应对半年后饮食行为和肥胖指数的预测作用。假设如下:

(1) 习惯化反应的行为指标 RT 转换成本与 BMI 变化显著正相关, 且能预测个体的 BMI 变化;

(2) Oz 位置 P1 差异波和 Oz 位置 P3 差异波与 BMI 变化显著负相关, 贬值和非贬值条件 POz 位置 P3b 与 BMI 变化显著正相关, 且能预测个体的 BMI 变化;

(3) 后期结果分类器准确性与 BMI 变化显著负相关, 且能预测个体的 BMI 变化。

5.2 方法

5.2.1 被试

半年后(平均 8.5 个月 \pm 2 周)对研究二招募的被试进行第二次施测, 由于近一半被试已经毕业, 本次施测采用线上问卷的方式。最终收回有效问卷 53 份(88.3%), 平均年龄为($M = 21.403, SD = 1.72$)岁。被试的 BMI 范围为 17.85-33.06kg/m², 平均 BMI 为($M = 24.317, SD = 3.986$), 被试的 BMI 变化范围为-14.47-5.01kg/m², 平均 BMI 变化量为($M = 0.282, SD = 2.535$)。所有被试均报告没有精神病史心血管系统、消化系统、进食障碍以及未服用影响认知功能和食欲的药物。

5.2.2 问卷材料

荷兰饮食行为问卷同研究一和二。本研究中, 荷兰饮食行为问卷的限制性饮食、情绪性饮食和外因性饮食分量表的 Cronbach's alpha 系数分别为 0.904、0.948 和 0.810。

5.2.3 数据分析

首先, 对前后测 BMI 与饮食行为问卷、基线习惯化反应行为指标和神经电生理指标进行相关分析。接着, 利用分层标准多元回归模型, 将人口统计学变量被纳入步骤 1, 相关显著的饮食行为问卷被纳入步骤 2, 然后与 BMI 变化量相关显著的基线指标被纳入步骤 3, 考察基线指标对 BMI 变化量的预测作用。

5.3 结果

5.3.1 相关分析结果

斯皮尔曼相关分析的结果显示, BMI 变化量与后测 BMI 显著正相关($r = 0.297, p = 0.029$), 与 Oz 位置 P1 差异波呈显著负相关 ($r = -0.297, p = 0.036$), 而其他相关均不显著。其他结果见表 11。

表 11 食物习惯化反应的行为和 ERP 指标的相关统计分析

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1															
2	-0.08	1														
基线																
3	-0.08	-0.27	1													
4	-0.07	-0.02	0.17	1												
5	-0.02	0.20	0.05	0.26*	1											
6	0.03	0.08	0.04	0.10	0.22	1										
后测																
7	0.30*	-0.26	0.91**	0.04	0.08	0.11	1									
8	0.07	0.03	0.26	0.59**	0.32*	0.31*	0.26	1								
9	0.12	0.14	0.04	0.24	0.72**	0.20	0.14	0.37**	1							
10	0.12	-0.04	.30*	0.26	0.24	0.35*	0.35*	0.40**	0.44**	1						
习惯化反应相关指标																
11	-0.07	-0.21	0.20	0.061	0.00	-0.15	0.23	-0.03	-0.03	-0.05	1					
12	-0.30*	0.05	-0.12	-0.13	-0.08	0.12	-0.23	-0.05	-0.10	-0.07	-0.08	1				
13	-0.16	-0.18	0.32*	0.05	-0.05	0.16	0.22	0.09	0.04	0.10	-0.03	0.04	1			
14	-0.04	-0.02	0.24	-0.05	-0.14	0.06	0.21	-0.03	-0.08	0.18	0.01	-0.04	0.83**	1		
15	-0.23	-0.07	0.00	-0.03	-0.05	0.06	-0.14	-0.07	-0.02	-0.16	0.01	0.58**	0.04	-0.04	1	
16	0.04	0.07	-0.30*	-0.28	0.01	0.27	-0.27	-0.20	-0.04	0.03	-0.35*	0.37**	-0.18	-0.18	0.29*	1

注: 1: BMI 变化量, 2: 年龄, 3: 基线 BMI, 4: 基线限制性饮食, 5: 基线情绪性饮食, 6: 基线外因性饮食, 7: 后测 BMI, 8: 限制性饮食, 9: 情绪性饮食, 10: 外因性饮食, 11: RT 转换成本, 12: Oz 位置 P1 差异波, 13: 非贬值线索 POz 位置 P3b, 14: 贬值线索 POz 位置 P3b, 15: Oz 位置 P3 差异波, 16: 后期结果分类器准确性; * $P < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

5.3.2 分层回归结果

由于相关分析中无饮食行为问卷与 BMI 变化量显著相关,因此在回归模型中的仅纳入人口学变量(年龄)和 Oz 位置 P1 差异波。模型显示,在控制了人口统计学变量后,研究二中 Oz 位置 P1 差异波对后测 BMI 的预测仍然显著($\beta = -0.379, t = -2.749, p = 0.009$)。

5.4 讨论

研究三在半年以后测量了研究二中被试的 BMI 和饮食行为问卷,并考察研究二中习惯化反应相关的指标是否能预测 BMI 的变化量。与假设一致的是,结果发现 Oz 位置 P1 差异波能显著预测 BMI 的变化量,即贬值条件下 Oz 位置 P1 振幅下降的越少,随后的 BMI 上升就越大。但是并未发现测验阶段贬值条件和非贬值条件 POz 位置 P3b 和 Oz 位置 P3 差异波与半年后 BMI 变化的关系,以及学习阶段奖赏表征的减弱与半年后 BMI 变化的关系。

Oz 位置的 P1 与视觉注意和刺激加工的初期阶段相关。P1 差异波越小,表明对于非贬值线索和贬值线索的注意程度就越相似,即贬值线索唤起个体的注意程度就越大。研究二已经证明,超重肥胖者在与线索关联的奖赏价值降低后,依旧对这一线索表现出较高的注意水平,表明超重肥胖者对食物线索预测的奖励价值变化不敏感,即使线索预测的奖励价值降低,这些线索也能够自动地捕获超重肥胖者的注意,在注意层面表现出类似习惯的特点。同时,研究二也发现这种对贬值线索的注意增加与学习阶段的目标导向控制减弱有关。因此,本研究中,Oz 位置 P1 振幅下降越少,可能意味着个体对贬值条件下的食物刺激的注意和加工保持相对稳定,反映了个体对奖赏价值变化的灵敏度较低,这在某种程度上可能由目标导向控制系统的不足来解释。

以往研究发现,有奖赏关联历史的线索会导致的认知表现暂时性的损害(Rusz et al., 2020),这些线索通过奖赏学习获得了与奖赏的关联,即便它们与当前任务无关时仍会捕获个体的注意力,并且更难抑制这些线索下的反应。Meyer 等人(2021)要求健康成人学习对中性刺激按键反应以获得金钱奖赏,使中性线索获得了奖赏关联历史,并在随后的抑制控制的任务中要求被试抑制对那些刺激的反应,发现相比无奖赏关联历史的线索,个体更难抑制对有奖赏关联历史的线索的反应。另一项对儿童到成年早期个体的研究中也发现,奖赏关联历史损害抑制控制能力,并且随年龄增长奖赏关联历史对抑制的干扰增加(Davidow et al., 2019)。

一些研究也发现了行为能否灵活地随目标调整能预测减肥干预和减肥手术后效果(Eichen et al., 2018; Santos Monteiro et al., 2022)。减肥手术前,在认知灵活性任务中较低的持续性错误评分预示着减肥手术后 12 个月和 24 个月的体重减轻,即能够灵活根据任务要求改变行为的个体在术后能够维持较轻的体重(Santos Monteiro et al., 2022)。另外,较低的持续性错误评分能预测儿童干预后的体重降低,而认知灵活性的改善能够预测儿童家长的体重降低(Eichen et al., 2018)。在神经方面,背侧纹状体与体感皮层之间的功能连接增加能够预测 BMI 的增加(Contreras-Rodríguez et al., 2017),而背侧纹状体是与习惯形成有关的脑区。然而,本研究并未

发现超重肥胖者的学习阶段的目标导向控制减弱与未来的 BMI 的增加相关的证据。基于研究二的发现，学习阶段后期的奖赏表征与 Oz 位置 P1 差异波显著相关的结果，因此本研究推测这可能由于学习阶段的目标导向控制对习惯化反应的是通过改变对贬值线索的注意过程产生的，因而不能直接预测 BMI 的变化量。

此外，本研究结果不支持贬值条件和非贬值条件 POz 位置 P3b 和 Oz 位置 P3 差异波与 BMI 变化显著相关的假设。这可能由于 P3 可能不仅反应对贬值食物线索的注意增加，也可能受到认知控制和个人动机的影响。研究表明发现，P3 可能与后期视觉注意的高阶处理有关，而 P3 振幅增强与内源性注意增强有关，而与外源性注意无关（Hopfinger et al., 2006）。这表明，Oz 位置的 P3 波形反应了一个包含多重认知过程的复合信号，既包括食物线索对注意的自动捕获，也包括对这些线索奖赏价值的主观评价，因而无法预测 BMI 变化。

综上所述，本文研究结果表明超重肥胖可能不仅仅是与对食物线索普遍的敏感性上升有关，更重要的是，对与当前饮食目标不符的食物线索表现出的过度敏感有关，并且这种敏感性的升高能够预测未来体重的增加。

6 总讨论

在全球范围内，超重和肥胖问题已成为一种流行病，不仅对人们的健康造成严重影响，也给社会经济带来了巨大负担。我国的超重和肥胖群体也逐年增加，涉及各个年龄段的人群。超重肥胖可能会带来身心问题，如增加高血压、糖尿病等代谢类疾病的风险、影响认知功能、导致情绪问题等。然而，“增肥容易减肥难”，尽管大部分肥胖的人报告有减肥计划或曾尝试减肥，但如何持续地减肥以及维持减肥效果依旧是个难题。以往研究强调了习惯在肥胖发展和进食行为干预方面的重要性，然而检验超重肥胖者是否存在食物习惯化反应的研究结论不一致。这可能与以往的测量范式和指标不够敏感有关，因此本研究采用 Luque 等人（2020）提出的改进后的工具学习任务检验超重肥胖者是否存在目标导向和习惯控制系统之间的不平衡。并且，采用 ERP 技术探讨超重肥胖者目标导向和习惯控制系统不平衡的神经机制，以及这些行为和神经上的改变是否能够预测半年后 BMI 变化。这将有助于理解超重肥胖者难以改变饮食方式，以及减肥效果难以维持的现象，同时为未来针对习惯化进食行为的干预提供理论支持。

研究一利用 Luque 等人（2020）提出的工具学习任务，旨在探究超重肥胖者是否存在目标导向和习惯控制系统的不平衡，并且是否与食物特异性相关。结果显示，在时间压力下，超重肥胖组对两种奖赏的 RT 转换成本显著增加，表明他们在获取奖赏时有更高的习惯化反应。而在非时间压力条件下，两组之间没有显著差异，表明时间压力版本的工具学习任务效果更好，因此在研究二中继续采用时间压力下的工具学习任务。研究二在研究一的基础上，采用真实的进食情境，探究超重肥胖群体对食物的习惯化反应。结果显示，超重肥胖组在工具学习任务中对贬值食物的 RT 转换成本显著高于健康体重组，再次证明了超重肥胖者对食物存在习惯化反应。此外，ERP 结果表明，在工具学习任务的测验阶段，健康体重组在观看贬值线索时的 Oz 位置 P1 振幅显著小于非贬值线索，而超重肥胖组的 P1 振幅无显著差异。同样的，在 Oz 位置，在贬值线索条件下超重肥胖组的 P3 振幅显著大于健康体重组，而非贬值线索组间差异不显著，表明超重肥胖者对于贬值线索的注意增加。另外，超重肥胖组的 POz 位置 P3 振幅显著大于健康体重组，可能反应超重肥胖者的工作记忆存在缺陷，因而在更新和维持奖赏结果价值的过程中需要花费更多的认知资源。MVPA 结果显示，在工具学习任务的学习阶段后期结果表征显著减少，表明超重肥胖群体的目标导向控制减弱。研究三对研究二中被试半年后的饮食行为和 BMI 进行了测量，并探究习惯化反应的行为和神经指标对未来体重的预测作用。结果显示，饮食行为、RT 转换成本等指标无法预测 BMI 的变化，但 Oz 位置 P1 差异波能显著预测 BMI 的变化量，即贬值条件下 Oz 位置 P1 振幅下降的越少，随后的 BMI 上升就越大。

6.1 超重肥胖者的习惯化反应

研究一采用工具学习任务（时间压力和无时间压力两个版本），采用食物和金钱两种奖赏，通过考察被试对贬值线索的反应，考察超重肥胖者是否表现出更多的习惯化反应，并且这种习惯化反应是否是食物特异的。研究一结果发现，在时间压力的范式下，与健康体重者相比，超重肥胖者在将食物和金钱奖赏的 RT 转换成本上显著增加。这表明超重肥胖者的习惯化反应增加，即当他们习得了奖赏线索与相应的反应之后，要改变他们的行为以符合新目标所需的时间更长，同时这种习惯化增加并非食物特异的。然而，在没有时间压力的情况下，两组的 RT 转换成本没有显著差异，表明时间压力下的范式能较好得探测出超重肥胖者潜在的习惯化反应。

由于超重肥胖问题与饮食习惯密切相关，因此研究二更深入地考察超重肥胖者对食物习惯化反应。采用感觉特异性饱腹感范式，使食物贬值的过程更符合日常情境。研究二的结果在行为上与研究一结果一致，再次证明了超重肥胖者存在更高的习惯化反应。

本研究从行为层面验证了超重肥胖者的目标导向和习惯控制存在不平衡，从而导致饮食行为在超重肥胖者中可能转化为一种习惯化反应，使得他们在面对食物线索时，即使没有饥饿感，仍然会习惯地进食(Ciria et al., 2021)。

这一结果与以往的两项研究结果存在一致性(Horstmann et al., 2015; Janssen et al., 2017)，这两项研究都采用了感觉特异性饱腹感范式来贬值食物奖赏价值，发现高 BMI 个体对与贬值奖赏有关线索的反应速度更快，表明他们尽管不再想吃这种食物，但他们仍会去积极获取这种食物，即说明高 BMI 个体对食物反应脱离了实际的奖赏价值，具有习惯化的特点。然而，以往部分研究未发现超重肥胖者具有更高的习惯化反应(Heriseanu et al., 2020; Voon et al., 2015)。这可能源于这些研究中使用的指标不够敏感，导致目标导向控制系统掩盖了习惯化反应(de Wit et al., 2018)，因而无法探测到超重肥胖者和健康体重者在习惯化反应上的潜在差异。

根据学习与行为控制的双系统理论，超重肥胖者的习惯化反应是由于目标导向和习惯控制系统的失衡。目标导向的控制系统依赖于状态空间的认知地图和决策的不同方面的整合，如目标或结果的价值，而习惯控制系统依赖于基于过去强化的历史，对目标或结果的价值变化不敏感(O'Doherty et al., 2017)。因而，行为由受目标导向的控制系统控制向受习惯控制系统控制的转变，促使个体对刺激做出先前习得的反应，而对反应后的结果不敏感。研究二的操纵检验也证实了，即便超重肥胖者报告对食物已经吃到不想吃了，他们对于这些食物还是表现出习惯化反应。

此外，由于以往研究发现，暴食症个体具有更高的习惯化反应(Heriseanu et al., 2020; Voon et al., 2015)。因此，本研究中剔除了具有进食障碍的个体，超重肥胖组和健康体重组均纳入的是无进食障碍的人群，这就排除了进食障碍（如，暴食症）对结果的干扰。

6.2 超重肥胖者食物习惯化反应的神经机制

研究二结合 ERP 技术,对食物习惯化反应的神经机制进行探讨,并采用 MVPA 技术,将影响习惯化反应的两个过程(目标导向和习惯控制)进行分离,从而探究超重肥胖者是哪一过程的异常导致了食物习惯化反应增加。结果发现,相比健康体重者,测验阶段超重肥胖者 Oz 位置 P1 和 P3 振幅在贬值线索下更高,表明超重肥胖者对贬值线索的注意具有类似习惯的特点,即对线索后奖励价值不敏感,贬值后的线索仍能自动地捕获超重肥胖者的注意;而超重肥胖者 POz 位置的 P3 振幅也显著大于健康体重者,可能也体现了他们在工作记忆等执行功能上的缺陷。另外, MVPA 分析发现,超重肥胖者在工具学习后期结果分类器准确性显著降低,表明目标导向控制在后期的参与度显著降低,并且后期结果分类器准确性与 RT 转换成本、贬值和非贬值线索下 Oz 位置 P1 和 P3 振幅差异显著相关,表明超重肥胖者随着训练的进行,目标导向控制减少,使得个体难以更新刺激后的奖赏大小,依旧对贬值刺激保持较高的注意程度,因而导致了食物习惯化反应。

学习与行为控制的双系统理论指出,在稳定的情境下反复训练,可以使目标导向行为变成习惯(Mazar & Wood, 2018; O'Doherty et al., 2017)。超重肥胖者后期结果分类器准确性显著降低,表明他们在学习后期对奖赏结果价值的评估显著减少,目标导向行为向习惯转变,因而在奖赏价值贬值后,难以依据当前的奖赏价值及时更新贬值线索后的反应。这种改变可能与他们的奖赏系统的改变有关。以往研究发现,背侧纹状体在目标导向和习惯控制系统中起着关键作用,该区域可能在超重肥胖者或短期内增重的个体中发生改变(Babbs et al., 2013; Contreras-Rodríguez et al., 2017; Zhang et al., 2023)。研究也发现,进食奶昔时的背内侧纹状体的激活降低与 BMI 和冲动性升高有关(Babbs et al., 2013)。同时,功能联结的结果也发现,超重个体的背侧纹状体和体感皮层之间的功能连接增加(Contreras-Rodríguez et al., 2017),高 BMI 者的背外侧纹状体和海马之间的功能连接增强,而多个执行控制相关的前额叶脑区的功能连接减弱(Zhang et al., 2023),这些结果可能反映了超重肥胖个体对食物奖赏的加工发生改变,进而导致超重肥胖个体在面对食物奖赏时,大脑的执行控制系统难以根据经验或环境变化而对奖赏价值进行灵活地调整。

本研究证明奖赏学习中目标导向控制的减少会导致随后对贬值线索的注意增加,而这一过程很可能是超重肥胖者习惯化反应增加的原因。注意可以指导行为,研究表明当操纵个体注意巧克力后,对巧克力的食用量增多(Werthmann et al., 2014)。注意力机制使得个体能够识别和处理环境中与食物相关的线索,从而做出适应性反应(如寻找和消费食物),这种机制在生存和繁衍中具有进化意义。然而,对奖赏线索的高度注意也是行为难以改变的重要原因之一。在药物成瘾中,个体对与药物获取和消费相关的环境线索表现出强烈的注意偏好,这种机制被认为是成瘾行为形成和维持的关键(Robinson & Berridge, 2003)。环境线索驱动的食物获取与药物成瘾者因环境线索而触发的复吸行为具有相似性。一方面,食物相关线索可能通

过激活中脑皮质边缘多巴胺神经回路,进而促发对食物的渴望和寻求,这一过程与断绝药物成瘾者所经历的强烈渴望及复吸行为类似(Reichelt et al., 2015);另一方面,随着时间的推移和反复暴露,对奖赏线索的注意可能导致行为的自动化,使行为在奖赏价值降低或线索与奖赏不再直接相关的情况下也会发生(Wood & Neal, 2007)。这种自动化的习惯行为,一旦形成,就较难通过意志力或认知控制来抑制,因此对线索的注意不仅是行为发生的触发因素,也是习惯化反应的基础。

6.3 食物习惯化反应对未来体重的预测作用

为了检验食物习惯化反应对体重是否具有预测作用,研究三追踪了研究二中的被试半年后的 BMI,发现 Oz 位置 P1 差异波可以显著预测未来的 BMI 变化量,这一结果表明,对贬值线索注意的增加能够预测未来体重的增加。

与动物研究的结果部分吻合,研究发现高糖高脂的饮食方式会促使行为由目标导向控制向习惯控制转变,进而导致了超重和肥胖的发生(Corbit et al., 2016)。研究三的结果尽管没有验证行为上食物习惯化反应指标和学习后期目标导向控制系统的参与度与半年后的 BMI 的变化量之间的相关,但与其相关的对贬值食物线索的注意增加能够预测体重增长,这与研究三的假设部分吻合。研究表明,先前与奖赏相关的刺激即使与当前任务无关也能自动捕获注意力,并绕过了目标导向的认知处理阶段,表现出类似习惯的反应(Anderson et al., 2016)。因而,即使个体实际上吃饱了,对食物线索注意增加也会导致进食行为绕过的目标导向的认知处理阶段,直接表现出来。

本研究扩展了以往认为超重肥胖者对于食物线索敏感性上升的研究。本研究发现,超重和肥胖可能不仅仅是与对食物线索的普遍的敏感性上升有关,更重要的是,对与当前饮食目标不符的食物线索的敏感性上升,并且这种敏感性的升高能够预测未来体重的增加。因此,本研究的发现强调了在设计针对肥胖干预措施时,需要更深入地理解超重肥胖者对食物线索的注意过程,尤其关注那些与过去经验紧密相关但当前已不再具有同等吸引力的刺激,这将有助于开发更为有效的减肥策略,并促进减肥效果的维持。

6.4 研究不足及未来展望

本研究采用脑电技术利用改进后的工具学习范式系统考察了超重肥胖者的食物习惯化反应,本研究结果支持了超重肥胖者的目标导向和习惯控制之间存在不平衡,揭示了超重肥胖者的食物习惯化反应的行为表现和神经机制。同时,本研究存在一些局限,可以在未来研究中进一步探讨。

首先,已有研究表明,超重肥胖者的大脑的奖赏系统对食物和金钱奖赏的反应是不同的。具体来说,肥胖个体的腹侧纹状体和背侧纹状体对食物刺激有更强的反应,而超重个体的腹侧纹状体、杏仁核和内侧额叶皮层对金钱刺激有更强的反应(Verdejo-Román et al., 2017)。因此,

本研究一中发现的超重肥胖者在获取食物奖赏和一般奖赏（金钱）均表现出习惯化的倾向，可能是由于本研究中未把超重和肥胖群体进行区分。此外，本研究未对金钱奖赏以及食物奖赏的奖赏价值进行量化评分，因而未能阐明金钱奖赏任务和食物奖赏任务中各高中低奖赏是否具有相对等的奖励价值，这可能影响刺激与金钱和食物奖赏关联的学习效果，以及在贬值后改变习惯行为的难易程度。因此，未来研究中需要分别对超重和肥胖个体两类奖赏下目标导向和习惯控制是否平衡进行研究，以及对应奖赏价值的两类奖励是否会对这两类群体产生相同的影响。

其次，由于研究中仅采用了高热量的零食（如，薯片、小蛋糕等），并没有对其他类型的食物（如，低热量食物、主食等）进行研究。因此，本研究发现超重肥胖者对食物的习惯化反应，以及对贬值食物线索注意增加对未来体重的预测作用的结论，不一定能应用到其他类型的食物中去。未来仍需要对其他类型的食物，尤其是主与日常生活直接关联的正餐进行研究，从而对超重肥胖的食物习惯化反应进行更细致的探索和验证。

最后，尽管综合本研究的结果，可以认为超重肥胖者存在目标导向与习惯的不平衡，尤其是注意的习惯化和目标导向控制的受损。但在解释这一结论时可能也需要考虑限制性饮食在其中的作用。研究一的被试普遍具有较高的限制性饮食水平（尽管组间差异不显著），而研究二中超重肥胖被试的限制性饮食水平显著高于健康体重的被试。综合研究一和研究二的结果可以发现，由于超重肥胖者相较于健康体重者在测验阶段，对贬值和非贬值食物的反应都表现得更慢，即需要更多的时间改变与目标相反的 S-R 反应，也需要更多的时间维持与目标一致的 S-R 反应，这可能超重肥胖群体的前额叶皮层的功能改变有关，导致他们难以有效地切换反应策略。先前研究发现失败限制性饮食者在面对食物刺激时的认知灵活性表现更差，即他们在调整思维或行为以适应新的、不同的或意外的情况时存在困难(Han et al., 2021)，因此高的限制性饮食者很可能伴随认知灵活性的不足，进而反应在改变行为的过程中。另一方面，在食物信息进行加工与处理过程中投入了更多认知资源也是限制性饮食者的特点(Han et al., 2021)，而认知资源的短缺也是导致行为向习惯控制转变的原因之一(Ognibene et al., 2019)。因此，对于采用节食的方式减肥的超重肥胖者来说，节食可能消耗他们的认知资源，反而导致了更多的食物习惯化反应，因而通常减肥难以成功。然而，为了探索是超重肥胖者的目标导向和习惯控制系统的不平衡是否只会在同时具有限制性饮食的群体中存在，仍需要对高限制性饮食的超重肥胖者和非限制性饮食的超重肥胖者进行更进一步的研究。

7 研究结论

本研究聚焦超重肥胖群体的学习与行为控制的双系统特征，利用横断和纵向的设计，在行为和神经电生理层面探究超重肥胖群体在获取食物时的特点。得出以下结论：

（1）超重肥胖群体目标导向控制系统和习惯控制系统之间存在不平衡，对食物和一般奖赏都表现出更高的习惯化反应；

（2）超重肥胖组对食物的习惯化反应，与测验阶段 Oz 位置 P1 和 P3 对贬值线索的振幅升高，以及工具学习学习阶段后期面对线索时的结果表征降低有关。

（3）测验阶段 Oz 位置 P1 差异波可以预测半年后的 BMI 的变化，即对贬值食物线索的注意增强可以预测未来的 BMI 上升。

综上所述，本研究发现了超重肥胖者在奖赏学习和决策过程中目标导向控制与习惯控制存在不平衡，揭示了超重肥胖与食物习惯化反应之间的关联，并在神经层面上进一步得到这种习惯化反应可能与测验阶段对贬值线索的注意增加和学习后期目标导向控制系统的减弱有关。这为理解肥胖的神经生物学基础提供了新的视角，为未来研究开发针对习惯的治疗和干预策略提供了理论支持。

参考文献

- 陈新文, 李鸿杰, & 丁玉珑. (2023). 探究事件相关脑电/脑磁信号中的神经表征模式: 基于分类解码和表征相似性分析的方法. *心理科学进展*, 31(2), 173-195.
- 董晨杰, 梁晶晶, 董玉媛, 郑钟艳, 彭子文. (2018). 目标导向-习惯学习系统的神经机制. *心理科学进展*, 26(4), 667-677.
- 宋雨, 刘杨, 高强, 刘俊杰, 李蕊娜 & 吉月辉. (2024). 基于脑电多域特征融合的跨任务认知负荷研究. *实验技术与管理*, 1-11.
- Adams, C.D., & Dickinson, A. (1981). Instrumental responding following reinforcer devaluation. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 33(2b), 109-121.
- Agresti, A., & Caffo, B. (2000). Simple and effective confidence intervals for proportions and differences of proportions result from adding two successes and two failures. *American Statistician*, 54(4), 280-288.
- Anderson, B.A. (2016). The attention habit: How reward learning shapes attentional selection. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1369(1), 24-39.
- Anderson, B.A., Folk, C.L., Garrison, R., & Rogers, L. (2016). Mechanisms of Habitual Approach: Failure to Suppress Irrelevant Responses Evoked by Previously Reward-Associated Stimuli. *Journal of Experimental Psychology-General*, 145(6), 796-805.
- Babbs, R.K., Sun, X., Felsted, J., Chouinard-Decorte, F., Veldhuizen, M.G., & Small, D.M. (2013). Decreased caudate response to milkshake is associated with higher body mass index and greater impulsivity. *Physiology & Behavior*, 121, 103-111.
- Baek, K., Morris, L.S., Kundu, P., & Voon, V. (2017). Disrupted resting-state brain network properties in obesity: decreased global and putaminal cortico-striatal network efficiency. *Psychological Medicine*, 47(4), 585-596.
- Balodis, I.M., Kober, H., Worhunsky, P.D., White, M.A., Stevens, M.C., Pearson, G.D., Sinha, R., Grilo, C.M., & Potenza, M.N. (2013). Monetary reward processing in obese individuals with and without binge eating disorder. *Biological Psychiatry*, 73(9), 877-886.
- Belin, D., Belin-Rauscent, A., Murray, J.E., & Everitt, B.J. (2013). Addiction: failure of control over maladaptive incentive habits. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(4), 564-572.
- Betsch, T., Haberstroh, S., Molter, B., & Glöckner, A. (2004). Oops, I did it again—relapse errors in routinized decision making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 93(1), 62-74.
- Boswell, R.G., & Kober, H. (2016). Food cue reactivity and craving predict eating and weight gain: a meta - analytic review. *Obesity Reviews*, 17(2), 159-177.
- Buabang, E.K., Köster, M., Boddez, Y., Van Dessel, P., De Houwer, J., & Moors, A. (2023). A

- Goal-Directed Account of Action Slips: The Reliance on Old Contingencies. *Journal of Experimental Psychology-General*, 152(2), 496-508.
- Burger, K.S., & Stice, E. (2014). Greater striatopallidal adaptive coding during cue-reward learning and food reward habituation predict future weight gain. *Neuroimage*, 99, 122-128.
- Ciria, L.F., Watson, P., Vadillo, M.A., & Luque, D. (2021). Is the habit system altered in individuals with obesity? A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 128, 621-632.
- Cleo, G., Beller, E., Glasziou, P., Isenring, E., & Thomas, R. (2020). Efficacy of habit-based weight loss interventions: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Behavioral Medicine*, 43(4), 519-532.
- Cleo, G., Isenring, E., Thomas, R., & Glasziou, P. (2017). Could habits hold the key to weight loss maintenance? A narrative review. *Journal of Human Nutrition Dietetics*, 30(5), 655-664.
- Colagiuri, B., & Lovibond, P.F. (2015). How food cues can enhance and inhibit motivation to obtain and consume food. *Appetite*, 84, 79-87.
- Contreras-Rodríguez, O., Martín-Pérez, C., Vilar-López, R., & Verdejo-García, A. (2017). Ventral and dorsal striatum networks in obesity: link to food craving and weight gain. *Biological Psychiatry*, 81(9), 789-796.
- Coppin, G., Nolan-Poupart, S., Jones-Gotman, M., & Small, D. (2014). Working memory and reward association learning impairments in obesity. *Neuropsychologia*, 65, 146-155.
- Corbit, L.H. (2016). Effects of obesogenic diets on learning and habitual responding. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 9, 84-90.
- Corbit, L.H. (2018). Understanding the balance between goal-directed and habitual behavioral control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 20, 161-168.
- Daffner, K.R., Chong, H., Sun, X., Tarbi, E.C., Riis, J.L., McGinnis, S.M., & Holcomb, P.J. (2011). Mechanisms Underlying Age- and Performance-related Differences in Working Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(6), 1298-1314.
- Davidow, J.Y., Sheridan, M.A., Van Dijk, K.R.A., Santillana, R.M., Snyder, J., & Bustamante, C.M.V. (2019). Development of Prefrontal Cortical Connectivity and the Enduring Effect of Learned Value on Cognitive Control. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(1), 64-77.
- Daw, N.D., Niv, Y., & Dayan, P. (2005). Uncertainty-based competition between prefrontal and dorsolateral striatal systems for behavioral control. *Nature Neuroscience*, 8(12), 1704-1711.
- De Decker, A., Sioen, I., Verbeken, S., Braet, C., Michels, N., & De Henauw, S. (2016). Associations of reward sensitivity with food consumption, activity pattern, and BMI in children. *Appetite*, 100, 189-196.
- de Wit, S., & Dickinson, A. (2009). Associative theories of goal-directed behaviour: a case for

- animal-human translational models. *Psychological Research PRPF*, 73(4), 463-476.
- de Wit, S., Kindt, M., Knot, S.L., Verhoeven, A.A., Robbins, T.W., Gasull-Camos, J., Evans, M., Mirza, H., & Gillan, C.M. (2018). Shifting the balance between goals and habits: Five failures in experimental habit induction. *Journal of Experimental Psychology: General*, 147(7), 1043-1065.
- de Wit, S., Van De Vijver, I., & Ridderinkhof, K. (2014). Impaired acquisition of goal-directed action in healthy aging. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 14(2), 647-658.
- Dolan, R.J., & Dayan, P. (2013). Goals and habits in the brain. *Neuron*, 80(2), 312-325.
- Eichen, D.M., Matheson, B.E., Liang, J.N., Strong, D.R., Rhee, K., & Boutelle, K.N. (2018). The relationship between executive functioning and weight loss and maintenance in children and parents participating in family-based treatment for childhood obesity. *Behaviour Research and Therapy*, 105, 10-16.
- Everitt, B.J., & Robbins, T.W. (2016). Drug addiction: updating actions to habits to compulsions ten years on. *Annual Review of Psychology*, 67(1), 23-50.
- Ezzati, M., Bentham, J., Di Cesare, M., Bilano, V., Bixby, H., Zhou, B., Stevens, G.A., Riley, L.M., Taddei, C., Hajifathalian, K., Lu, Y., Savin, S., Cowan, M.J., Paciore, C.J., Chirita-Emandi, A., Hayes, A.J., Katz, J., Kelishadi, R., Kengne, A.P., ... Cisneros, J.Z. (2017). Worldwide trends in body-mass index, underweight, overweight, and obesity from 1975 to 2016: a pooled analysis of 2416 population-based measurement studies in 128.9 million children, adolescents, and adults. *Lancet*, 390(10113).
- Flagel, S.B., Clark, J.J., Robinson, T.E., Mayo, L., Czuj, A., Willuhn, I., Akers, C.A., Clinton, S.M., Phillips, P.E.M., & Akil, H. (2011). A selective role for dopamine in stimulus-reward learning. *Nature*, 469(7328), 53-U63.
- Flore, G., Preti, A., Carta, M.G., Deledda, A., Fosci, M., Nardi, A.E., Loviselli, A., & Velluzzi, F. (2022). Weight Maintenance after Dietary Weight Loss: Systematic Review and Meta-Analysis on the Effectiveness of Behavioural Intensive Intervention. *Nutrients*, 14(6), 1259.
- Gao, X., Liang, Q., Wu, G., She, Y., Sui, N., & Chen, H. (2018). Decreased resting-state BOLD regional homogeneity and the intrinsic functional connectivity within dorsal striatum is associated with greater impulsivity in food-related decision-making and BMI change at 6-month follow up. *Appetite*, 127, 69-78.
- Gardner, B., Richards, R., Lally, P., Rebar, A., Thwaite, T., & Beeken, R.J. (2021). Breaking habits or breaking habitual behaviours? Old habits as a neglected factor in weight loss maintenance. *Appetite*, 162, 105183.
- Ghobadi-Azbari, P., Khayati, R.M., & Ekhtiari, H. (2023). Habituation or sensitization of brain response to food cues: Temporal dynamic analysis in an functional magnetic resonance imaging study.

- Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 13.
- Giel, K.E., Teufel, M., Junne, F., Zipfel, S., & Schag, K. (2017). Food-Related Impulsivity in Obesity and Binge Eating Disorder-A Systematic Update of the Evidence. *Nutrients*, 9(11), 1170.
- Gillan, C.M., Pappmeyer, M., Morein-Zamir, S., Sahakian, B.J., Fineberg, N.A., Robbins, T.W., & de Wit, S. (2011). Disruption in the balance between goal-directed behavior and habit learning in obsessive-compulsive disorder. *American Journal of Psychiatry*, 168(7), 718-726.
- Groetswagers, T., Wardle, S.G., & Carlson, T.A. (2017). Decoding Dynamic Brain Patterns from Evoked Responses: A Tutorial on Multivariate Pattern Analysis Applied to Time Series Neuroimaging Data. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 29(4), 677-697.
- Haith, A.M., Pakpoor, J., & Krakauer, J.W. (2016). Independence of movement preparation and movement initiation. *Journal of Neuroscience*, 36(10), 3007-3015.
- Han, J.F., Liu, Y., Song, S.Q., Wang, Y.N., Zhang, X.M., & Chen, H. (2021). Effects of food stimuli on event-related potentials of restrained eating subgroups during task switching. *Neuroscience Letters*, 754, 7.
- Han, J., Zhuang, K., Chen, X., Xiao, M., Liu, Y., Song, S., Gao, X., & Chen, H. (2024). Connectivity-based neuromarker for children's inhibitory control ability and its relevance to body mass index. *Child Neuropsychology*, 1-18.
- Hardwick, R.M., Forrence, A.D., Krakauer, J.W., & Haith, A.M. (2019). Time-dependent competition between goal-directed and habitual response preparation. *Nature Human Behaviour*, 3(12), 1252-1262.
- Hartmann, H., Pauli, L.K., Janssen, L.K., Huhn, S., Ceglarek, U., & Horstmann, A. (2020). Preliminary evidence for an association between intake of high-fat high-sugar diet, variations in peripheral dopamine precursor availability and dopamine-dependent cognition in humans. *Journal of Neuroendocrinology*, 32(12), e12917.
- Hartogsveld, B., Quaedflieg, C.W., van Ruitenbeek, P., & Smeets, T. (2022). Volume and connectivity differences in brain networks associated with cognitive constructs of binge eating. *Eneuro*, 9(1).
- Pi-Sunyer, F.X., Becker, D.M., Bouchard, C., Carleton, R.A., Colditz, G.A., Dietz, W.H., Foreyt, J.P., Garrison, R.J., Grundy, S.M., Hansen, B.C., Higgins, M., Hill, J.O., Howard, B.V., Kuczmarski, R.J., Kumanyika, S., Legako, R.D., Prewitt, T.E., Rocchini, A.P., Smith, P.L., ... Wilson, G.T., Clinical guidelines on the identification, evaluation, and treatment of overweight and obesity in adults: Executive summary. *American Journal of Clinical Nutrition*, 68(4), 899-917
- Heinze, H.J., Luck, S.J., Munte, T.F., Gos, A., Mangun, G.R., & Hillyard, S.A. (1994). Attention to Adjacent and Separate Positions in-space – an Electrophysiological Analysis. *Perception & Psychophysics*, 56(1), 42-52.

- Heriseanu, A.I., Hay, P., Corbit, L.H., & Touyz, S. (2020). Relating goal-directed behaviour to grazing in persons with obesity with and without eating disorder features. *Journal of Eating Disorders*, 8(1), 1-14.
- Hendrikse, J. J., Cachia, R. L., Kothe, E. J., McPhie, S., Skouteris, H., & Hayden, M. J. (2015). Attentional biases for food cues in overweight and individuals with obesity: a systematic review of the literature. *Obesity Reviews*, 16(5), 424-432.
- Hickey, C., Chelazzi, L., & Theeuwes, J. (2010). Reward Changes Saliency in Human Vision via the Anterior Cingulate. *Journal of Neuroscience*, 30(33), 11096-11103.
- Hillyard, S.A., Vogel, E.K., & Luck, S.J. (1998). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 353(1373), 1257-1270.
- Horstmann, A., Dietrich, A., Mathar, D., Poessel, M., Villringer, A., & Neumann, J. (2015). Slave to habit? Obesity is associated with decreased behavioural sensitivity to reward devaluation. *Appetite*, 87, 175-183.
- Horstmann, A., Fenske, W.K., & Hankir, M.K. (2015). Argument for a non - linear relationship between severity of human obesity and dopaminergic tone. *Obesity Reviews*, 16(10), 821-830.
- Jansen, A., Schyns, G., Bongers, P., & van den Akker, K. (2016). From lab to clinic: Extinction of cued cravings to reduce overeating. *Physiology & Behavior*, 162, 174-180.
- Janssen, L.K., Duif, I., van Loon, I., Wegman, J., de Vries, J.H., Cools, R., & Aarts, E. (2017). Loss of lateral prefrontal cortex control in food-directed attention and goal-directed food choice in obesity. *Neuroimage*, 146, 148-156.
- Janssen, L.K., Mahner, F.P., Schlagenhauf, F., Deserno, L., & Horstmann, A. (2020). Reliance on model-based and model-free control in obesity. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14.
- Kahnt, T., Park, S.Q., Haynes, J.D., & Tobler, P.N. (2014). Disentangling neural representations of value and saliency in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(13), 5000-5005.
- Kleih, S.C., Nijboer, F., Halder, S., & Kübler, A. (2010). Motivation modulates the P300 amplitude during brain-computer interface use. *Clinical Neurophysiology*, 121(7), 1023-1031.
- Kong, F., Zhang, Y., & Chen, H. (2013). The construct validity of the Restraint Scale among mainland Chinese women. *Eating Behaviors*, 14(3), 356-360.
- Kroemer, N.B., & Small, D.M. (2016). Fuel not fun: Reinterpreting attenuated brain responses to reward in obesity. *Physiology & Behavior*, 162, 37-45.
- Liu, Y., Gao, X., Zhao, J., Zhang, L.L., & Chen, H. (2020). Neurocognitive Correlates of Food-Related Response Inhibition in Overweight/Obese Adults. *Brain Topography*, 33(1), 101-111.

- Liu, Y., Quan, H., Song, S.Q., Zhang, X.M., Yang, C., & Chen, H. (2019). Decreased Conflict Control in Overweight Chinese Females: Behavioral and Event-Related Potentials Evidence. *Nutrients*, *11*(7), 12.
- Lovibond, P.F., & Lovibond, S.H. (1995). The structure of negative emotional states: Comparison of the Depression Anxiety Stress Scales (DASS) with the Beck Depression and Anxiety Inventories. *Behaviour Research and Therapy*, *33*(3), 335-343.
- Lu, Y., Hajifathalian, K., Ezzati, M., Woodward, M., Rimm, E.B., Danaei, G., & D'Este, C. (2014). Metabolic mediators of the effects of body-mass index, overweight, and obesity on coronary heart disease and stroke: a pooled analysis of 97 prospective cohorts with 1.8 million participants. *Lancet*, *383* (9921), 970-983.
- Luque, D., Beesley, T., Morris, R.W., Jack, B.N., Griffiths, O., Whitford, T.J., & Le Pelley, M.E. (2017). Goal-directed and habit-like modulations of stimulus processing during reinforcement learning. *Journal of Neuroscience*, *37*(11), 3009-3017.
- Luque, D., Molinero, S., Watson, P., López, F.J., & Le Pelley, M.E. (2020). Measuring habit formation through goal-directed response switching. *Journal of Experimental Psychology: General*, *149*(8), 1449-1459.
- MacLean, M.H., & Giesbrecht, B. (2015). Neural evidence reveals the rapid effects of reward history on selective attention. *Brain Research*, *1606*, 86-94.
- Malvaez, M. (2020). Neural substrates of habit. *Journal of Neuroscience Research*, *98*(6), 986-997.
- Mathar, D., Neumann, J., Villringer, A., & Horstmann, A. (2017). Failing to learn from negative prediction errors: Obesity is associated with alterations in a fundamental neural learning mechanism. *Cortex*, *95*, 222-237.
- Mazar, A., & Wood, W. (2018). Defining habit in psychology. In B. Verplanken (Ed.), *The psychology of habit* (pp. 13-29). Cham, Switzerland: Springer.
- Mazar, A., & Wood, W. (2021). Illusory Feelings, Elusive Habits: Explanations of Behavior Overlook Habits. *Psychological Science*, *33* (4), 563-578.
- Meier, J.K., Staresina, B.P., & Schwabe, L. (2022). Stress diminishes outcome but enhances response representations during instrumental learning. *Elife*, *11*, 25.
- Miller, A.A., & Spencer, S.J. (2014). Obesity and neuroinflammation: a pathway to cognitive impairment. *Brain, Behavior, and Immunity*, *42*, 10-21.
- Miller, R.K., & Martin, F.H. (2020). Deconstructing threat: Rethinking the interplay between biological and social relevance in the emotional salience of unpleasant images. *Biological Psychology*, *149*, 13.
- Molinero, S., Giménez-Fernández, T., López, F.J., Carretié, L., & Luque, D. (2021). Stimulus-response learning and expected reward value enhance stimulus cognitive processing: An ERP study.

- Psychophysiology*, 58(5), 14.
- Moore, C.F., Sabino, V., Koob, G.F., & Cottone, P. (2017). Pathological overeating: emerging evidence for a compulsivity construct. *Neuropsychopharmacology*, 42(7), 1375-1389.
- Murphy, B., Poesio, M., Bovolo, F., Bruzzone, L., Dalponte, M., & Lakany, H., (2011). EEG decoding of semantic category reveals distributed representations for single concepts. *Brain and Language*, 117, 12-22.
- Müller-Putz, G., Scherer, R., Brunner, C., Leeb, R., & Pfurtscheller, G. (2008). Better than random: a closer look on BCI results. *International Journal of Bioelectromagnetism*, 10(1), 52-55.
- O'Doherty, J.P., Cockburn, J., & Pauli, W.M. (2017). Learning, reward, and decision making. *Annual Review of Psychology*, 68, 73-100.
- Ognibene, D., Fiore, V.G., & Gu, X.S. (2019). Addiction beyond pharmacological effects: The role of environment complexity and bounded rationality. *Neural Networks*, 116, 269-278.
- Pearson, D., Osborn, R., Whitford, T.J., Failing, M., Theeuwes, J., & Le Pelley, M.E. (2016). Value-modulated oculomotor capture by task-irrelevant stimuli is a consequence of early competition on the saccade map. *Attention Perception & Psychophysics*, 78(7), 2226-2240.
- Peelen, M.V., & Downing, P.E. (2023). Testing cognitive theories with multivariate pattern analysis of neuroimaging data. *Nature Human Behaviour*, 7(9), 1430-1441.
- NCD Risk Factor Collaboration (2024). Worldwide trends in underweight and obesity from 1990 to 2022: a pooled analysis of 3663 population-representative studies with 222 million children, adolescents, and adults. *The Lancet*. 403(10431), 1027-1050.
- Pierce-Messick, Z., & Corbit, L.H. (2021). Problematic eating as an issue of habitual control. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 110, 110294.
- Polich, J. (2007). Updating p300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148.
- Polich, J., & Criado, J.R. (2006). Neuropsychology and neuropharmacology of P3a and P3b. *International Journal of Psychophysiology*, 60(2), 172-185.
- Pool, E.R., Gera, R., Fransen, A., Perez, O.D., Cremer, A., Aleksic, M., Tanwisuth, S., Quail, S., Ceceli, A.O., Manfredi, D.A., Nave, G., Tricomi, E., Balleine, B., Schonberg, T., Schwabe, L., & O'Doherty, J.P. (2022). Determining the effects of training duration on the behavioral expression of habitual control in humans: a multilaboratory investigation. *Learning & Memory*, 29(1), 16-28.
- Pornpattananangkul, N., & Nusslock, R. (2015). Motivated to win: Relationship between anticipatory and outcome reward-related neural activity. *Brain and Cognition*, 100, 21-40.
- Qu, Z., Hillyard, S.A., & Ding, Y.L. (2017). Perceptual Learning Induces Persistent Attentional Capture by Nonsalient Shapes. *Cerebral Cortex*, 27(2), 1512-1523.

- Reber, J., Feinstein, J.S., O'Doherty, J.P., Liljeholm, M., Adolphs, R., & Tranel, D. (2017). Selective impairment of goal-directed decision-making following lesions to the human ventromedial prefrontal cortex. *Brain*, *140*, 1743-1756.
- Reichelt, A.C., Westbrook, R.F., & Morris, M.J. (2015). Integration of reward signalling and appetite regulating peptide systems in the control of food-cue responses. *British Journal of Pharmacology*, *172*(22), 5225-5238.
- Robinson, T.E., & Berridge, K.C. (2003). Addiction. *Annual Review of Psychology*, *54*, 25-53.
- Rothmund, Y., Preuschhof, C., Bohner, G., Bauknecht, H.C., Klingebiel, R., Flor, H., & Klapp, B.F. (2007). Differential activation of the dorsal striatum by high-calorie visual food stimuli in obese individuals. *Neuroimage*, *37*(2), 410-421.
- Rusz, D., Le Pelley, M.E., Kompier, M.A.J., Mait, L., & Bijleveld, E. (2020). Reward-Driven Distraction: A Meta-Analysis. *Psychological Bulletin*, *146*(10), 872-899.
- Sato, A., Yasuda, A., Ohira, H., Miyawaki, K., Nishikawa, M., Kumano, H., & Kuboki, T. (2005). Effects of value and reward magnitude on feedback negativity and P300. *Neuroreport*, *16*(4), 407-411.
- Santos Monteiro, P., Ribeiro, O. R., & Ribeiro, F. (2022). The role of cognitive flexibility in weight loss after severe obesity surgery-A retrospective study. *Clinical Obesity*, *12*(1), e12494.
- Schag, K., Schönleber, J., Teufel, M., Zipfel, S., & Giel, K. (2013). Food-related impulsivity in obesity and Binge Eating Disorder-a systematic review. *Obesity Reviews*, *14*(6), 477-495.
- Schreiner, D.C., Renteria, R., & Gremel, C.M. (2020). Fractionating the all-or-nothing definition of goal-directed and habitual decision-making. *Journal of Neuroscience Research*, *98*(6), 998-1006.
- Simpson, C.C., Burnette, C.B., & Mazzeo, S.E. (2020). Integrating eating disorder and weight gain prevention: A pilot and feasibility trial of INSPIRE. *Eating and Weight Disorders-Studies on Anorexia, Bulimia and Obesity*, *25*(3), 761-775.
- Smith, N.K., Cacioppo, J.T., Larsen, J.T., & Chartrand, T.L. (2003). May I have your attention, please: Electroocortical responses to positive and negative stimuli. *Neuropsychologia*, *41*(2), 171-183.
- Song, S., Li, Q., Jiang, Y., Liu, Y., Xu, A., Liu, X., & Chen, H. (2022). Do overweight people have worse cognitive flexibility? Cues-triggered food craving may have a greater impact. *Nutrients*, *14*(2), 240.
- Stice, E., & Burger, K. (2019). Neural vulnerability factors for obesity. *Clinical Psychology Review*, *68*, 38-53.
- Stice, E., Fisher, M., & Martinez, E. (2004). Eating disorder diagnostic scale: additional evidence of reliability and validity. *Psychological Assessment*, *16*(1), 60-71.
- Stice, E., Telch, C.F., & Rizvi, S.L. (2000). Development and validation of the Eating Disorder Diagnostic Scale: a brief self-report measure of anorexia, bulimia, and binge-eating disorder. *Psychological Assessment*, *12*(2), 123.

- Tomasi, D., & Volkow, N.D. (2013). Striatocortical pathway dysfunction in addiction and obesity: differences and similarities. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 48(1), 1-19.
- Treder, M.S. (2020). MVPA-Light: A Classification and Regression Toolbox for Multi-Dimensional Data. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 19.
- van den Akker, K., Stewart, K., Antoniou, E.E., Palmberg, A., & Jansen, A. (2014). Food cue reactivity, obesity, and impulsivity: are they associated?. *Current Addiction Reports*, 1(4), 301-308.
- van Strien, T., Frijters, J.E., Bergers, G.P., & Defares, P.B. (1986). The Dutch Eating Behavior Questionnaire (DEBQ) for assessment of restrained, emotional, and external eating behavior. *International Journal of Eating Disorders*, 5(2), 295-315.
- Verdejo-Román, J., Vilar-López, R., Navas, J.F., Soriano-Mas, C., & Verdejo-García, A. (2017). Brain reward system's alterations in response to food and monetary stimuli in overweight and obese individuals. *Human Brain Mapping*, 38(2), 666-677.
- Verleger, R. (2020). Effects of relevance and response frequency on P3b amplitudes: Review of findings and comparison of hypotheses about the process reflected by P3b. *Psychophysiology*, 57(7), 22.
- Verleger, R., Metzner, M. F., Ouyang, G., Smigajewicz, K., & Zhou, C.S. (2014). Testing the stimulus-to-response bridging function of the oddball-P3 by delayed response signals and residue iteration decomposition (RIDE). *Neuroimage*, 100, 271-289.
- Vilà-Balló, A., Salmi, J., Soveri, A., Rodríguez-Fornells, A., Lehtonen, M., & Laine, M. (2018). Neural signatures for active maintenance and interference during working memory updating. *Biological Psychology*, 132, 233-243.
- Volkow, N.D., Wang, G.J., Tomasi, D., & Baler, R.D. (2013). Obesity and addiction: neurobiological overlaps. *Obesity Reviews*, 14(1), 2-18.
- Volkow, N.D., Wise, R.A., & Baler, R. (2017). The dopamine motive system: implications for drug and food addiction. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(12), 741-752.
- Voon, V., Derbyshire, K., Rück, C., Irvine, M. A., Worbe, Y., Enander, J., Schreiber, L.R.N., Gillan, C., Fineberg, N.A., Sahakian, B.J., Robbins, T.W., Harrison, N.A., Wood, J., Daw, N.D., Dayan, P., Grant, J.E., Bullmore, E.T., & Sahakian, B.J. (2015). Disorders of compulsivity: a common bias towards learning habits. *Molecular Psychiatry*, 20(3), 345-352.
- Watson, D., Clark, L.A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063.
- Watson, P., & de Wit, S. (2018). Current limits of experimental research into habits and future directions. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 20, 33-39.
- Watson, P., Wiers, R.W., Hommel, B., Gerdes, V.E., & De Wit, S. (2017). Stimulus control over action for food in obese versus healthy-weight individuals. *Frontiers in Psychology*, 8, 580.

- Werthmann, J., Field, M., Roefs, A., Nederkoorn, C., & Jansen, A. (2014). Attention bias for chocolate increases chocolate consumption - An attention bias modification study. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 45(1), 136-143.
- Weydmann, G., Miguel, P.M., Hakim, N., Dubé, L., Silveira, P.P., & Bizarro, L. (2024). How are overweight and obesity associated with reinforcement learning deficits? A systematic review. *Appetite*, 193, 14.
- Wood, W., Mazar, A., & Neal, D.T. (2022). Habits and goals in human behavior: Separate but interacting systems. *Perspectives on Psychological Science*, 17(2), 590-605.
- Wood, W., & Neal, D.T. (2007). A new look at habits and the habit-goal interface. *Psychological Review*, 114(4), 843-863.
- Wood, W., & Rünger, D. (2016). Psychology of habit. *Annual Review of Psychology*, 67(1), 289-314.
- Wu, Y.K., & Berry, D.C. (2018). Impact of weight stigma on physiological and psychological health outcomes for overweight and obese adults: A systematic review. *Journal of Advanced Nursing*, 74(5), 1030-1042.
- Yang, Y., Shields, G.S., Guo, C., & Liu, Y. (2018). Executive function performance in obesity and overweight individuals: A meta-analysis and review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 84, 225-244.
- Yousuf, M., Heldmann, M., Münte, T.F., & Doñamayor, N. (2019). Electrophysiology of goal-directed versus habitual control during outcome devaluation. *Cortex*, 119, 401-416.
- Zhang, Y., Ji, W., Jiang, F., Wu, F., Li, G., Hu, Y., Zhang, W.C., Wang, J., Fan, X., Wei, X.R., Manza, P., Tomasi, D., Volkow, N.D., Gao, X.B., Wang, G.J., & Zhang, Y. (2023). Associations among body mass index, working memory performance, gray matter volume, and brain activation in healthy children. *Cerebral Cortex*, 33(10), 6335-6344.
- Zhang, Z., Manson, K.F., Schiller, D., & Levy, I. (2014). Impaired associative learning with food rewards in obese women. *Current Biology*, 24(15), 1731-1736.
- Zhao, J., Manza, P., Gu, J., Song, H., Zhuang, P., Shi, F., Dong, Z.Q., Lu, C., Wang, G.J., & He, D. (2021). Contrasting dorsal caudate functional connectivity patterns between frontal and temporal cortex with BMI increase: link to cognitive flexibility. *International Journal of Obesity*, 45(12), 2608-2616.

附录

1. 主观饥饿度评分

请根据你的真实感受进行评定。

1.你当前的饥饿程度：0%（一点也不饥饿）-----100%（非常饥饿）

2.你当前的想进食渴望程度：0%（非常不想）-----100%（非常渴望）

3.你饱的程度：0%（非常不满意）-----100%（非常满意）

2. 正负性情绪量表 (Positive and Negative Affect Scale)

请评估过去两周体验到这些情绪形容词的程度，选择对应的选项。

	从 不	很 少	有 时	经 常	总 是
1. 警惕的					
2. 活跃的					
3. 害怕的					
4. 羞耻的					
5. 有决心的					
6. 痛苦的					
7. 兴奋的					
8. 有罪恶感的					
9. 敌意的					
10. 有灵感的					
11. 有兴趣的					
12. 易怒的					
13. 神经过敏的					
14. 紧张的					
15. 自豪的					
16. 受惊吓的					
17. 强有力的					
18. 不安的，难过的					
19. 注意的，关心的					
20. 热情的					

3. 抑郁焦虑压力量表-21 (the Depression Anxiety Stress Scales, DASS-21) 抑郁分量表

请根据下列句子适合你的程度，选择对应的选项。

	不符合	有点符合	经常符合	总是符合
1. 我似乎完全不能积极乐观起来				
2. 我发现很难发挥主动性去做事				
3. 我感到我对未来没什么可期待的				
4. 我感到消沉和沮丧				
5. 我对任何事情都没法充满热情				
6. 我感到自己曾不怎么配做人				
7. 我感到生命毫无意义				

3. 荷兰饮食行为问卷 (The Dutch Eating Behavior Questionnaire, DEBQ)

请根据下列句子适合你的程度，选择对应的选项。

	从 不	很 少	有 时	经 常	总 是
1. 如果你的体重增加了，你会吃得比平时少吗？					
2. 在进餐时，你会尝试吃得比你想要的更少吗？					
3. 因为要减肥，你会多频繁的拒绝提供的食物或者饮料？					
4. 你会仔细的关注你吃的东西吗？					
5. 你会故意的吃利于减肥的食物吗？					
6. 当你吃得过多时，你会在随后的日子中吃得比平时少吗？					
7. 你会故意地通过少吃来避免长胖吗？					
8. 因为在减肥，你会有多频繁的尝试在两餐之间不吃东西？					
9. 当你在减肥时，你会多频繁的尝试在晚上不吃东西？					
10. 你会考虑你的体重与你吃的东西(的关系)吗？					
11. 当你被激怒时，你渴望吃东西吗？					
12. 当你无所事事时，你渴望吃东西吗？					
13. 当你抑郁或是气馁时，你渴望吃东西吗？					
14. 当你感到孤独寂寞时，你渴望吃东西吗？					
15. 当某人让你失望时，你渴望吃东西吗？					
16. 当你发脾气时，你渴望吃东西吗？					
17. 当你遇到某些不愉快的事时，你渴望吃东西吗？					
18. 当你紧张、担心或是焦虑时，你渴望吃东西吗？					
19. 当事与愿违或者事情不顺利时，你渴望吃东西吗？					
20. 当你害怕时，你渴望吃东西吗？					
21. 当你失望时，你渴望吃东西吗？					
22. 当你情绪低落时，你渴望吃东西吗？					

23. 当你无聊或者焦虑不安时, 你渴望吃东西吗?					
24. 如果食物尝起来很好, 你会比平时吃得更多吗?					
25. 如果食物闻起来和看起来都不错, 你会比平时吃得更多吗?					
26. 如果你看到或是闻到一些美味的东西, 你渴望吃它吗?					
27. 如果你有美味的东西, 你想马上就吃掉它吗?					
28. 如果你路过面包坊, 你渴望买一些美味的东西吗?					
29. 如果你路过小吃店或者小餐厅, 你渴望去买些它们的美食吗?					
30. 如果你看到别人在吃东西, 你也会渴望吃吗?					
31. 你可以抵制美味食物(的诱惑)吗?					
32. 当你看到他人在进食时, 你会比平常吃得更多吗?					
33. 当你准备膳食时, 你会倾向于吃些东西吗?					

4. 进食障碍诊断量表 (the Eating Disorder Diagnostic Scale, EDDS)

请根据下列句子适合你的程度, 选择对应的选项。

	一点也不———极度
1. 你感到胖吗?	0 1 2 3 4 5 6
2. 对自己体重增加, 或变胖(超重)你有过明确的害怕吗?	0 1 2 3 4 5 6
3. 你的体重影响了你对自己作为一个人的看法(或判断)吗?	0 1 2 3 4 5 6
4. 你的体形影响了你对自己作为一个人的看法(或判断)吗?	0 1 2 3 4 5 6
5. 在过去的6个月内, 有几次你觉得自己吃了在别人看来1超出寻常的大量(异常多)的食品(如一升的冰淇淋)?	是 否
6. 在你吃超出寻常的大量的食物这几次中, 你体验到一种失控(感到不能停止吃, 或控制当时吃什么或吃多少)?	是 否
7. 过去6个月中, 平均每周有多少天, 你吃了超出寻常的大量(异常多)的食物, 并体验到失控?	0 1 2 3 4 5 6 7
8. 在过去的3个月中, 平均每周有多少次, 你吃了超出寻常的大量(异常多)的食物, 并体验到失控?	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
在这些吃得过多和失去控制期间, 你有没有:	
9. 进食速度比平常快很多?	是 否
10. 一直吃东西, 直到感觉你的胃胀得不舒服为止?	是 否
11. 有没有吃大量的东西, 即使生理上完全不感到饿?	是 否
12. 一个人吃饭, 因为你对自己所吃的数量感到尴尬?	是 否
13. 吃得过多之后, 觉得自己很讨厌, 或者抑郁、内疚?	是 否
14. 有没有对自己无法控制的过度进食行为或导致的体重增加感到非常不安?	是 否
15. 在过去的3个月中, 你平均每周有多少次, 让自己呕吐以防止体重增加或抵消进食带来的影响?	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

附录

16. 在过去的3个月中，你平均每周使用多少次泻剂或利尿剂来防止体重增加或抵消进食带来的影响？	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
17. 在过去的3个月中，你平均每周节食多少次（至少连续两顿饭不吃），以防止体重增加或抵消进食带来的影响？	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
18. 在过去的3个月中，你平均每周进行多少次超量的运动，以抵消过度进食带来的影响？	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
19. 你体重多少？如果不确定，请给出一个尽可能准确的数字（公斤）	___kg
20. 你的身高多少？（米）	___m
21. （成年女性填）在过去的3个月中，你有几次没来月经？	0 1 2 3
22. （成年女性填）过去的3个月中，你一直服用避孕药？	是 否

5. 食物评分

请你仔细阅读题目，选择符合自己的选项。

<p>1. 布丁： 你有多想吃布丁：0%（一点也不想）----100%（非常想吃）</p> <hr/> <p>你有多喜欢吃布丁：0%（一点也不喜欢）----100%（非常喜欢）</p>	
<p>2. 蛋糕： 你有多想吃蛋糕：0%（一点也不想）----100%（非常想吃）</p> <hr/> <p>你有多喜欢吃蛋糕：0%（一点也不喜欢）----100%（非常喜欢）</p>	
<p>3. 薯片： 你有多想吃薯片：0%（一点也不想）----100%（非常想吃）</p> <hr/> <p>你有多喜欢吃薯片：0%（一点也不喜欢）----100%（非常喜欢）</p>	
<p>4. 干脆面： 你有多想吃干脆面：0%（一点也不想）----100%（非常想吃）</p> <hr/> <p>你有多喜欢吃干脆面：0%（一点也不喜欢）----100%（非常喜欢）</p>	