



儿童慢食行为与身体质量指数的神经影像学关联: 基于中国儿童大脑结构常模的研究

李恩莹^{1,2}, 位东涛^{1,2}, 董德波^{1,2}, 高笑^{1,2*}, 陈红^{1,2*}

1. 西南大学心理学部, 重庆 400715;

2. 西南大学认知与人格教育部重点实验室, 重庆 400715

* 联系人, E-mail: gaoxiaox@swu.edu.cn; chenhg@swu.edu.cn

2024-04-09 收稿, 2024-06-20 修回, 2024-07-02 接受, 2024-07-04 网络版发表

国家自然科学基金(32271087, 32071046)资助

摘要 中国儿童超重肥胖比率不断增长, 危害儿童身心健康。因此, 有必要关注儿童肥胖问题, 探究儿童饮食行为与肥胖的脑结构关联。慢食行为是儿童饮食行为中潜在的重要关键因素, 在增强饱腹感的同时减少能量摄入, 能够有效预防和改善肥胖问题, 但已有研究未深入探讨其脑结构基础。本研究选取99名儿童, 年龄范围为9~12岁, 平均年龄为 10.476 ± 0.855 岁, 通过儿童饮食行为量表的慢食维度测量儿童的慢食行为, 使用磁共振成像仪采集脑影像数据, 获取脑区皮层体积并映射到中国儿童脑体积常模上, 进一步得到儿童脑区皮层体积在常模上的相对位置参数。相关分析结果表明, 身体质量指数(body mass index, BMI)与慢食行为($r = -0.383$, $P < 0.001$)呈负相关, 与舌回皮层体积($r = 0.304$, $P = 0.002$)和后扣带回皮层体积呈正相关($r = 0.392$, $P < 0.001$), 慢食行为与后扣带回皮层体积呈负相关($r = -0.221$, $P = 0.028$)。中介模型表明后扣带回皮层体积在儿童慢食行为与身体质量指数之间存在中介作用, 中介效应值为 -0.088 。后扣带回具有重要的奖赏和执行控制功能, 引导注意力焦点(进食体验、进食过程)和支持内部导向认知(奖赏状态、饱腹状态)。慢食行为的儿童感知进食过程并识别饱腹信号, 适时停止进食行为, 而快速进食的儿童在进食体验带来的奖赏中忽视了饱腹状态, 往往与过度进食产生肥胖有关。本研究提供了儿童慢食行为和身体质量指数稳健的脑结构基础证据, 并且为从减缓餐内饮食速度入手改善儿童肥胖问题提供理论参考。

关键词 儿童, 慢食行为, 后扣带回, 舌回, 身体质量指数, 磁共振成像

中国儿童的超重和肥胖率迅速上升。根据《儿童蓝皮书: 中国儿童发展报告(2021)》显示, 2010年中国中小学生超重肥胖率为15.5%, 2014年上升到20.4%, 2019年再次上升至24.2%。肥胖与多种疾病高度相关, 包括糖尿病、心血管疾病、非酒精性脂肪肝病和性早熟, 肥胖并发症的患病率持续增加, 危及儿童的身心健康^[1,2]。2020年10月, 中国多个政府部门发布了《儿童青少年肥胖防控实施方案》, 旨在加强儿童青少年肥胖防控工作, 促进儿童青少年健康成长^[2]。身体质量指数

(body mass index, BMI)通常用来衡量人体肥胖程度和健康状况, 用体重(kg)与身高(m)的平方之比来表示(kg/m^2)^[3]。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)和国际肥胖工作组(International Obesity Task Force, IOTF)均使用身体质量指数作为肥胖筛查指标。不良的饮食行为包括暴饮暴食和挑食偏食往往会导致儿童肥胖问题。然而, 慢食行为帮助儿童控制进食量, 增强对于食物的满足感和饱腹感, 减少身体质量指数, 能够有效预防和改善肥胖问题^[4]。因此, 在肥胖预防策略和公

引用格式: 李恩莹, 位东涛, 董德波, 等. 儿童慢食行为与身体质量指数的神经影像学关联: 基于中国儿童大脑结构常模的研究. 科学通报, 2024, 69: 3597–3607
Li E Y, Wei D T, Dong D B, et al. Neuroimaging association between children's slowness in eating and body mass index: A study based on Chinese children's brain structural norms (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 3597–3607, doi: [10.1360/TB-2024-0380](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0380)

公共卫生实践中,深入了解儿童慢食行为特征,探究儿童肥胖增长发育的结构基础对于制定儿童肥胖预防和治疗策略具有重要意义。

慢食行为(*slowness in eating*, SE)表现为缓慢而彻底地咀嚼食物。儿童慢食行为与身体质量指数之间存在关联的潜在机制可能是能量摄入的减少^[5]。快速进食造成短期的高能量摄入,儿童通过口腔快速传递的热量在很大程度上未被感知,从而干扰饱腹感信号,快速进食者在胃部产生饱腹信号之前过度进食,而重复快速进食可能通过胰岛素抵抗导致肥胖^[6]。行为易感性理论认为遗传因素、食欲特征和肥胖之间存在关联,更快的进食速度是食欲特征的行为标志,使儿童倾向于摄入更高的能量,增加肥胖风险^[7]。相反,缓慢进食有助于增加饱腹感,避免过度进食。慢食行为与身体质量指数的相关性也已被实证研究所证实,研究者在成年人、儿童和幼儿群体中都发现了一致的结果。有研究发现,成年人总咀嚼次数和用餐时间与身体质量指数相关^[8],增加咀嚼次数能够显著降低能量摄入^[9]。84名健康女大学生的客观进食速度和主观进食速度均与身体成分和身体形态有关,快速进食与超重呈正相关关系^[10]。大学生群体的纵向研究也揭示了一致的关联,在3年的随访中,快速进食者超重的比值是非快速进食者的4.4倍^[11],在8年的随访中,快速进食组的体重增加了1.9 kg,而中等进食组和缓慢进食组的体重增加了0.7 kg^[12]。成年人进食速度的干预研究也得到了有效性检验,McGee等人^[13]使用口腔容量限制装置对参与者进行了为期4个月的干预,该装置在进餐时佩戴在上腭部,减少了咬合大小,从而降低了进食速度,研究发现使用该设备的参与者减轻了更多的体重。在健康体重儿童(9~10岁)中,研究者发现基线和3年后报告快速进食的女孩在BMI、腰围、体脂百分比和腰围身高比方面的增长都显著高于报告非快速进食的女孩^[14]。除此之外,一项在美国儿童中进行的为期8周的干预实验旨在通过营养教育、计时器和与家人的互动活动来降低进食速度,结果发现进食速度的降低与BMI的降低有关^[15]。Okubo等人^[16]的前瞻性队列研究发现,30月龄幼儿的进食速度与超重或肥胖显著正相关,并且幼儿进食速度越快,42月龄时的身体质量指数值越高。从另一方面来讲,超重和肥胖个体也更倾向于选择快速的进食方式。研究者同样发现成年女性中超重和肥胖个体与消瘦个体相比进食速度更快^[17]。针对平均年龄为4.5岁儿童的研究发现,超重/肥胖儿童较同年龄段正常

体重儿童进食速度更快,口腔运动特点表现为较大的咬合面积、咀嚼次数少、单次咀嚼时食物在口腔暴露时间短等^[18]。针对4岁儿童饮食行为的研究也发现,与正常体重的儿童相比,超重儿童具有更少的慢食行为,这反映了更快的饮食习惯,一口的进食量更大^[19]。进食速度快的个体,单位时间内摄取到的食物更多,能量摄入也就更多,从而更容易表现为肥胖,造成恶性循环。因此,本研究认为儿童慢食行为与身体质量指数负相关。

越来越多的研究关注到肥胖个体脑结构和功能的变化^[20-22]。身体质量指数的变化受到视觉加工(枕叶、舌回、梭状回)、奖赏(额叶、纹状体、眶额叶皮层、岛叶、杏仁核、海马体、扣带回)和执行控制(背外侧前额叶、扣带回)等功能的影响。Van Der Laan等人^[23]使用定量元分析评估视觉食物线索的神经反应收敛性,与非食物视觉线索相对,食物视觉线索组被试报告了梭状后回、左外侧眶额叶皮层和脑岛的一致激活。同样,Tang等人^[24]的元分析也发现对正常体重参与者呈现视觉食物刺激后,在前部和中部岛叶、杏仁核、海马旁回、中央后回和舌回中识别出了一致的激活。除此之外,一项荟萃分析发现,与正常体重个体相比,肥胖患者额下回灰质减少,包括岛叶、和大脑皮层,这表明在肥胖个体中,认知和奖赏相关的区域发生了结构变化^[25]。与瘦个体相比,肥胖个体表现出与奖赏和动机相关脑区(背侧纹状体、眶额叶皮层、扣带回、海马体和岛叶)的激活增加^[26]。身体质量指数还受到大脑执行控制功能的影响,有研究使用食物停止信号任务发现身体质量指数较高的个体在食物刺激条件下额上回、楔前回、中央前回和边缘上回的激活程度较低,这些脑区尤其与抑制控制有关,且身体质量指数水平较高的参与者额下回的激活与抑制控制能力呈显著负相关^[27]。此外,抑制控制区域(包括额下回和额上回)参与度较低的被试表现出更高水平的未来体重增加的趋势^[28]。纷繁复杂的脑网络共同影响着饮食行为与肥胖。叙述性评论讨论了饮食行为、肥胖和功能性脑组织之间的关联,同时强调体重相关的静息态功能连接在各种功能性脑网络中的差异,包括显著性、默认模式网络和中央执行网络^[29]。慢食行为中的饱腹感检测和奖赏驱动进食也受到与奖赏(额叶、纹状体、眶额叶皮层、岛叶、杏仁核、海马体、扣带回)和执行控制(背外侧前额叶、扣带回)负向相关的脑结构影响^[26],共同预测儿童身体质量指数发展。因此,本研究认为儿童慢食行为与身体质量指数之间存在脑结构关联。

针对儿童慢食行为的研究能够为儿童肥胖预防和干预带来新见解。研究者虽然对于慢食行为与身体质量指数的关系具有较为一致的见解,但已有的研究方法存在一些局限性^[10]。首先,前人关于慢食行为的测量多采用自我报告的方法^[8,17],将进食速度划分为快速进食、中等进食和缓慢进食,这种方式具有较强的主观性,而且对于身心状况仍在发展的儿童来说是不科学的;其次,已有研究大多从激素与内稳态视角探讨慢食行为与身体质量指数之间关联的内在机制^[18],而有关脑结构系统性模型的研究相对匮乏。儿童慢食行为与身体质量指数之间的相关性具有复杂的大脑关联,但研究者对不同脑区的功能缺乏明确共识,尤其是缺少对于慢食行为与大脑皮质体积特征关联的探讨^[30]。除此之外,前人关于慢食行为与身体质量指数之间关联的潜在机制探究多聚焦于能量摄入与饱腹感,而忽视了食物给儿童带来的奖赏^[4]。快速进食的个体对食物的反应性更强,表现为更强的进食动机,对于食物带来的奖赏更敏感^[31]。也就是说,快速进食的儿童更侧重于奖赏带来的心理体验,忽视了胃部饱腹感的生理变化,而具有更多慢食行为的儿童则对于饱腹感的感知较强,在面对奖赏时也能及时抑制进食行为。奖赏和抑制控制又受到不同脑区的影响,因此,本研究创新性地从饱腹感和奖赏视角解释儿童慢食行为与身体质量指数的关联,并探究相应脑区的结构变化。综上所述,本研究提出以下假设,探究儿童慢食行为与身体质量指数之间的脑结构关联: (1) 儿童慢食行为与身体质量指数之间存在负相关关系; (2) 儿童慢食行为和身体质量指数与大脑结构存在相关关系,包括视觉加工(枕叶、舌回、梭状回)、奖赏(额叶、纹状体、眶额叶皮层、岛叶、杏仁核、海马体、扣带回)和执行控制(背外侧前额叶、扣带回)功能相关的脑区; (3) 儿童慢食行为与身体质量指数之间存在与视觉加工、奖赏和执行控制相关的脑结构关联。

1 方法

1.1 被试

通过在小学进行宣讲的方式招募被试,研究者与学校负责人以及家长进行了沟通,参与者及家长自愿报名参加本次研究。纳入标准为: 未有固定金属假牙、心脏起搏器或金属假体植入; 所有被试均为右利手,视力正常或者矫正视力正常,非色盲患者,无精神疾病史

和慢性疾病。本研究最终纳入有效被试99人,年龄为8.917~12.083岁($M_{\text{年龄}}=10.476$, $SD=0.855$), BMI为 $-2.687\sim3.339$ ($M_{\text{BMI}}=0.577$, $SD=1.328$), 其中女生49人,男生50人。本研究由西南大学心理学部伦理委员会批准(伦理编号为H22003), 每名儿童的一位家长签署知情同意书,实验结束后得到一定报酬。

1.2 测量工具

人口统计学信息。在正式实验开始之前收集被试的人口统计学信息,包括年龄、性别、年级等,女生还需报告是否有月经初潮。儿童的身高和体重使用苏宏医用身高体重秤进行测量。

儿童慢食行为。由儿童的一位养育者使用《儿童饮食行为问卷》(The Child Eating Behavior Questionnaire, CEBQ)慢食行为维度对儿童的慢食行为进行评价^[32],如“我的孩子吃东西很慢”。对于每个题目都以五点量表进行评分(1=“从不”到5=“总是”),计算每个维度得分,较高的分数表示儿童慢食行为的发生率较高。在本研究中,CEBQ问卷慢食维度的内部一致性系数为0.824。

1.3 实验程序

首先,通过在小学进行宣讲的方式招募被试,根据纳入标准筛选被试。其次,在实验开始之前向每名被试提供知情同意书,测量人口统计学信息以及《儿童饮食行为问卷》慢食行为维度。然后进入正式实验阶段,主试向被试说明核磁扫描的流程和注意事项,带领被试在模拟机器上体验扫描环境。主试经被试同意为其换上实验室提供的专属扫描服,并取下身上所有的金属配件,主试将使用金属探测器进行检测以确保被试身上没有任何金属物品。实验室为被试提供了在扫描期间佩戴的耳塞,以最大限度地减少仪器产生的噪音。被试进入扫描仪器后,扫描员为其调整体位,并使用泡沫块填补头部与仪器之间的空隙,以减少扫描过程中的头部运动,准备就绪后开始进行大脑结构扫描,扫描时长为8分钟。扫描结束后,扫描员将被试带离扫描室。

1.4 MRI数据收集

采用3.0-T Siemens Trio 核磁共振扫描仪,使用12通道全脑线圈(Siemens Medical, Erlangen, Germany)获取了高分辨率T1加权结构图像,采用磁化准备快速梯

度回波序列(MPRAGE)(回波时间=2.52ms; 重复时间=1900ms; 反转时间=900ms; 翻转角度=9°; 层数=176; 视野=256×256; 体素大小=1 mm×1 mm×1 mm).

1.5 预处理及皮质表面重建和测量

所有皮质分区和基于表面的皮质重建均使用Free-Surfer软件(5.3版本, <https://surfer.nmr.mgh.harvard.edu>)进行. 简而言之, T1加权图像首先经历了一系列预处理步骤, 包括强度不均匀性校正、颅骨剥离、组织分类和表面提取. 在每个半球中, 白质被分割, 并通过镶嵌生成表面. 在修正拓扑缺陷后, 通过向外推白质表面产生脑膜表面. 在重建过程中, 多个检查点(颅骨剥离、白质分段和脑膜表面)进行了视觉检查, 并纠正了分割错误. 皮质厚度(cortical thickness, CT)通过计算从灰/白边界到灰/脑脊液(cerebrospinal fluid, CSF)边界每个顶点的最短距离来测量. 接下来, 表面被分割为单独的皮质区域, 使用自动标记方法. 最后, 为分区方案(即Des-trieux模板)中的每个148个区域(每个半球74个)提取了平均皮质体积(cortical volume, CV, 单位mm³)^[33].

1.6 基于中国儿童大脑结构常模的校正

儿童大脑在发育过程中会经历快速的变化和成长, 为消除可能存在的文化或种族差异对脑结构研究结果的影响, 确保所得到的常模图表更具代表性和可靠性, 更准确地反映中国儿童的脑发育情况以及不同年龄段儿童的脑结构特征, 本研究对儿童样本的脑区平均体积进行校正. 基于中国人彩巢计划团队建立的跨度20年的健康人群脑智毕生发展队列构建的中国人脑毕生发展常模, 对本研究样本99名儿童148个脑区的平均体积进行了校正^[34,35]. 根据使用位置、尺度和形状的广义可加模型(generalised additive models of location scale and shape, GAMLSS)的规范参考模型, 绘制跨越一生的神经解剖学发展轨迹. 这是基于75241名典型发展个体的样本, 包括总灰质体积(grey matter volume, GMV)、

皮层下灰质体积(subcortical grey matter volume, sGMV)、白质体积(white matter volume, WMV)、脑室体积、总表面积、平均皮层厚度和区域皮层厚度(cortical thickness, CT)、体积(volume, CV)和表面积(surface area, SA), 考虑到年龄、性别和地点/扫描仪^[36]. 基于这些参考模型, 使用Brent的最大似然估计为研究样本生成了样本外规范百分位分数, 量化了样本中的规范大脑发展变化. 每个百分位分数是通过量化结构性MRI表型与参考曲线的垂直偏差来计算的, 这些参考曲线按性别分层. 该工具结合了一个样本外的模型参数估计器, 其中最大似然法被用来估计研究特定的随机效应, 这允许使用累积密度函数来评分百分位数. 后续分析全部采用基该校正体积数据进行.

1.7 统计分析

首先, 为根据全球范围内的儿童生长标准对儿童的身体质量指数进行评估和比较, 增强样本代表性, 使用2006年世界卫生组织(World Health Organization, WHO)儿童生长发育标准年龄别BMI计算儿童BMI标准分数, 供后续数据分析使用^[37]. 其次, 对儿童年龄、性别、BMI和慢食行为得分进行描述性统计和相关分析. 然后, 为探究儿童慢食行为和身体质量指数与脑结构的关联, 将收集到的被试脑区皮层体积映射到中国儿童大脑体积常模上, 进一步得到个体脑区体积在常模上的相对位置参数, 使用皮尔逊积差相关计算基于脑区皮层体积的相关分析. 最后, 在控制年龄和性别的情况下, 使用中介效应检验儿童慢食行为与身体质量指数的大脑结构关联, 自变量为儿童慢食行为得分, 中介变量为后扣带回皮层体积, 因变量为BMI.

2 结果

2.1 描述性统计

变量的描述性统计和相关分析如表1所示. BMI与

表 1 儿童BMI和慢食行为描述性统计和相关结果(N=99)^{a)}

Table 1 Descriptive statistics and correlation results of children's BMI and slowness in eating(N=99)

变量	平均值	标准差	范围	1	2	3	4
1 年龄	10.476	0.855	8.917~12.083	—	0.110	0.112	-0.042
2 性别	—	—	—	0.110	—	0.204*	-0.091
3 BMI	0.577	1.328	-2.687~3.339	0.112	0.204*	—	-0.383***
4 慢食行为	10.654	3.332	4~18	-0.042	-0.091	-0.383***	—

a) N, 样本量; *, P<0.05; ***, P<0.001; —, 无数据

性别呈正相关($r=0.204$, $P=0.043$), 与慢食行为($r=-0.383$, $P<0.001$)呈负相关(图1(a)), 与年龄不存在相关关系($r=0.112$, $P=0.271$)。慢食行为与年龄($r=-0.042$, $P=0.678$)、性别($r=-0.091$, $P=0.369$)均不存在相关关系。

2.2 儿童慢食行为、BMI与脑区皮层体积的相关分析

首先, 采用皮尔逊积差相关分析考察儿童慢食行为与全脑各个脑区皮层体积的相关性, 结果发现, 慢食

行为与后扣带回皮层体积呈负相关($r=-0.221$, $P=0.028$) (图1(b))。其次, 采用皮尔逊积差相关考察BMI与全脑各个脑区皮层体积的相关, 结果显示(图1(c, d)), BMI与舌回皮层体积呈正相关($r=0.304$, $P=0.002$), 且与后扣带回皮层体积呈正相关($r=0.392$, $P<0.001$)。

2.3 儿童慢食行为与身体质量指数的大脑结构关联

为了探究慢食行为影响儿童肥胖的潜在大脑基础,

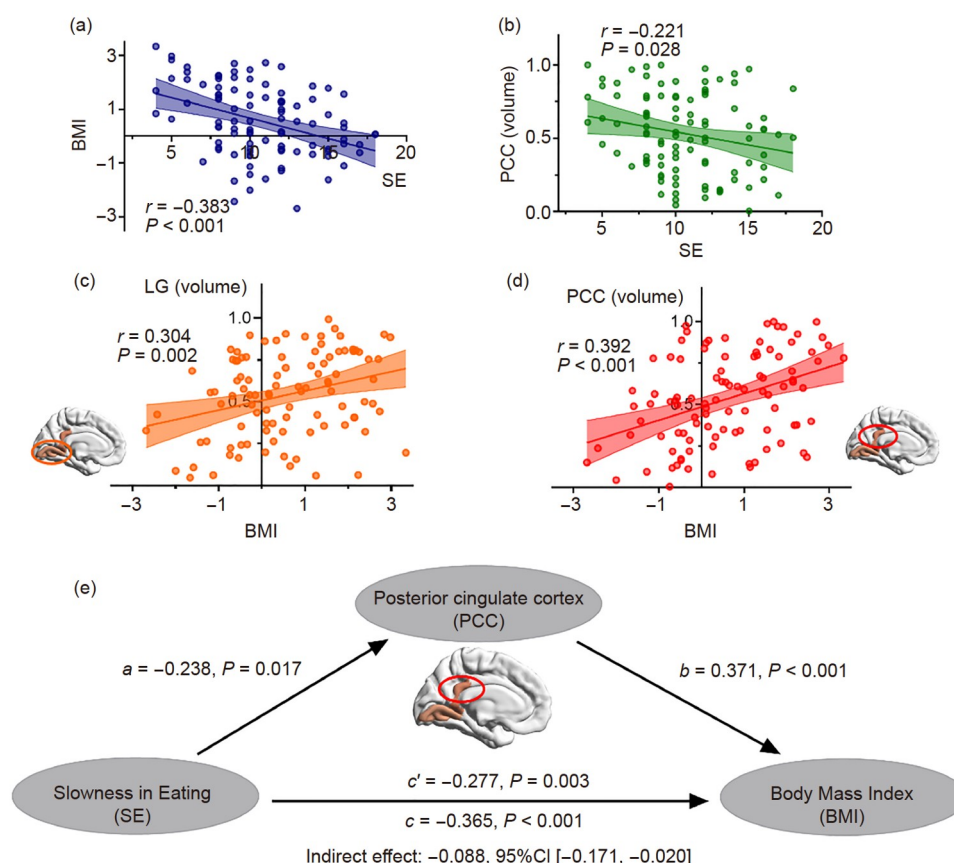


图 1 (网络版彩色)儿童慢食行为与身体质量指数的大脑结构关联。(a) 儿童慢食行为与BMI呈负相关关系($r=-0.383$, $P<0.001$), 散点表示每个儿童的得分, 并有相应的拟合曲线及95%置信区间。(b) 儿童慢食行为与后扣带回皮层体积呈负相关关系($r=-0.221$, $P=0.028$), 散点表示每个儿童的得分, 并有相应的拟合曲线及95%置信区间。(c) 儿童BMI与舌回皮层体积呈正相关关系($r=0.304$, $P=0.002$), 散点表示每个儿童的得分, 并有相应的拟合曲线及95%置信区间。(d) 儿童BMI与后扣带回皮层体积呈正相关关系($r=0.392$, $P<0.001$), 散点表示每个儿童的得分, 并有相应的拟合曲线及95%置信区间。(e) 儿童慢食行为与BMI之间脑结构关联的中介路径图, 中介变量为后扣带回皮层体积, 所指示区域为后扣带回。BMI, 身体质量指数; LG, 舌回; PCC, 后扣带回; SE, 慢食行为

Figure 1 (Color online) Structural brain correlates of children's slowness in eating and BMI. (a) Children's slowness in eating is negatively correlated with BMI ($r=-0.383$, $P<0.001$), with scatter points representing the scores of each child, along with the corresponding fitted curve and 95% confidence interval. (b) Children's slowness in eating is negatively correlated with the volume of posterior cingulate cortex ($r=-0.221$, $P=0.028$), with scatter points representing the scores of each child, along with the corresponding fitted curve and 95% confidence interval. (c) Children's BMI is positively correlated with the volume of lingual gyrus ($r=0.304$, $P=0.002$), with scatter points representing the scores of each child, along with the corresponding fitted curve and 95% confidence interval. (d) Children's BMI is positively correlated with the volume of the posterior cingulate cortex ($r=0.392$, $P<0.001$), with scatter points representing the scores of each child, along with the corresponding fitted curve and 95% confidence interval. (e) A mediation pathway diagram of the brain structural correlation between children's slow eating behavior and BMI, with the posterior cingulate cortex volume as the mediating variable, indicating the region of the posterior cingulate cortex. BMI, body mass index; LG, lingual gyrus; PCC, posterior cingulate cortex; SE, slowness in eating

在控制年龄和性别后,进一步以慢食行为为自变量,后扣带回皮层体积为中介变量,BMI为因变量,进行中介效应分析.结果显示,慢食行为通过后扣带回皮层体积对BMI的间接效应值为-0.088,95%的Bootstrap置信区间为[-0.171, -0.020],占总效应24.110%;加入中介变量后扣带回皮层体积后,慢食行为对BMI的直接效应为-0.277,95%的Bootstrap置信区间为[-0.181, -0.040].中介效应路径分析结果如表2及图1(e)所示.

3 讨论

本研究通过儿童饮食行为量表的慢食行为维度测量以及磁共振成像探究慢食行为对肥胖的影响,探讨儿童慢食行为与身体质量指数的脑结构关联.研究结果表明,儿童慢食行为与身体质量指数存在负相关关系,且与负责奖赏和执行控制的后扣带回的皮层体积呈显著负相关.儿童身体质量指数与负责视觉加工、奖赏及执行控制的脑结构有关,具体表现在与舌回和后扣带回的强相关性.除此之外,本研究还发现儿童慢食行为与肥胖之间的关联存在一定的脑结构基础,即后扣带回皮层体积在慢食行为与肥胖的关系中存在中介作用.

本研究的发现与前人结果相一致,儿童慢食行为与身体质量指数显著负相关^[10,38].缓慢咀嚼的过程中,儿童更深刻地感知到自己的进食行为,对饱腹感信号更敏感,在摄入大量能量之前适时停止进食行为,防止肥胖发生.然而,习惯性快速进食的儿童缺乏对进食行为的意识,对饱腹感信号不敏感,沉浸在食物奖赏带来的心理体验而忽视进食过程带来的饱腹生理体验,持

续性的进食导致大量的能量摄入,因此往往与超重肥胖有关.与前人研究相一致,快速进食与成人^[18]和儿童^[39]的能量摄入量增加有关,较慢的进食速度可能会增强饱腹感信号的发展,从而限制总食物摄入量^[40].Jackson等人^[38]通过对8~12岁儿童的非饥饿进食实验发现,缓慢进食行为与较低的能量摄入有关,在一餐中缓慢咀嚼和增加咀嚼周期与肥胖呈负相关^[10].与之相反,自我报告的快速进食速度与亚洲儿童的体重状况较高和腰围较大有关^[16,41].近年来的研究报告显示,快速进食与较高的膳食能量摄入、BMI^[42]、肥胖患病率^[43,44]以及某些代谢紊乱^[41,45]有关.关于儿童慢食行为的研究从横向和纵向视角都发现了其与肥胖的关联,尤其是餐内慢食行为的干预更加证实了慢食行为对于预防儿童肥胖风险的有效性,减慢进食速度是一种在增加饱腹感的同时减少能量摄入的有前景的策略.

后扣带回皮层体积与儿童慢食行为显著负相关,且舌回和后扣带回皮层体积与身体质量指数之间的强相关表明视觉加工、奖赏和执行控制在慢食行为及肥胖中的重要作用.舌回与大脑对食物线索的视觉处理和注意力分配有关^[46].一方面,舌回调节和维持对食物刺激的注意力,另一方面,它在处理食物线索的视觉信息时表现出活动增加,对于食物刺激的视觉反应性更强^[47,48].本研究发现了儿童身体质量指数与舌回之间的正相关关系,肥胖儿童对于食物线索的视觉注意更灵敏,对食物的反应性更强,而对食物刺激更敏感的儿童更倾向于过度进食,产生肥胖问题.视觉功能决定了对于食物的感知,舌回在加工食物的视觉信息、引发食欲及进食行为中扮演着关键角色,食物的颜色、形

表 2 中介效应分析^{a)}

Table 2 Mediation analysis results

路径	β	SE	P	95%CI	
				LLCI	ULCI
总效应					
c: SE→BMI	−0.365	0.037	<0.001	−0.219	−0.072
直接效应					
a: SE→PCC	−0.238	0.008	0.017	−0.036	−0.004
b: PCC→BMI	0.371	0.438	<0.001	0.937	2.678
c': SE→BMI	−0.277	0.035	0.003	−0.181	−0.040
间接效应					
SE→PCC→BMI	−0.088	0.039	—	−0.171	−0.020

a) c表示慢食行为对BMI的总效应, a表示慢食行为影响后扣带回的路径, b表示后扣带回影响身体质量指数的路径, c'表示慢食行为对身体质量指数的直接效应

状和纹理等视觉特征的加工能够显著影响个体的食欲,造成个体体重的增加^[48]。在慢性偏头痛患者的研究中发现,双侧舌回与扣带回之间的功能连接与身体质量指数呈正相关,这说明舌回在视觉信息处理和大脑奖赏系统中的作用与身体质量指数的变化有关^[49]。本研究发现后扣带回皮层体积与儿童慢食行为存在负相关关系,与身体质量指数存在正相关关系,与前人结果相一致^[16]。后扣带皮层是一个高度连接且代谢活跃的大脑区域,是默认网络的重要枢纽^[50]。后扣带回在大脑网络中具有较强的连接特性,与食物奖赏和执行控制有关。缓慢进食的儿童认知侧重于进食过程,饱腹感的生理体验强于奖赏带来的心理体验,对于奖赏信号不敏感,而后扣带回皮层与机体奖赏功能有关,因此,慢食行为与后扣带回皮层体积负相关。肥胖个体对食物奖赏信号更敏感,与奖赏相关的脑区结构较为完整,因此,儿童身体质量指数与后扣带回皮层体积正相关。

后扣带回皮层体积对于慢食行为与身体质量指数之间的关联具有中介作用。一方面,后扣带回与默认网络的强连接使得其在自我反思、记忆回忆等过程中发挥作用,也与个体的内感受、情感处理和自我意识等功能相关;另一方面,后扣带回连接着参与认知控制的额叶和顶叶区域,与执行功能、决策制定和注意力控制等高级认知过程有关,尤其涉及到认知控制和注意力调节^[51]。慢食行为较少的个体更享受进食的乐趣,将更多的注意资源投入在积极的进食体验上,在快速进食大量食物的同时忽略了对于饱腹感的感知,后扣带回维持对食物相关刺激的高反应性^[52],个体不抑制对食物的渴望,快速进食通过神经调控与身体质量指数的增加相关联。更重要的是,慢食行为水平较低的个体与奖赏相关的脑区神经反应较强^[31],食物带来的奖赏水平较高,后扣带回活动功能增强,个体选择尽情享受进食过程,短时间内的快速进食造成较高的超重、肥胖风险。然而,慢食行为较多的个体投入更多的注意资源在进食过程,对饱腹状态有清晰的感知,弱化了食物带来的奖赏,不足以引起后扣带回的活跃状态,个体将注意力集中在外部的进食状态以及内部的饱腹感,以平衡进食行为,往往与较低的身体质量指数有关。已有研究揭示后扣带回是检测环境变化并激发行为转变的神经中枢,参与编码和整合内部动机驱动的行为倾向到决策过程中^[53,54]。有研究发现,与瘦儿童相比,肥胖儿童在用餐快结束时缺乏对于饱腹感的认知,进食量增加,进食率下降的幅度较小,摄入大量食物,造成肥

胖问题^[55]。除此之外,预期奖赏相关的食物选择转移与后扣带回活动强度的增加有关^[56], Simon等人^[57,58]研究发现,与金钱奖励相比,食物奖励诱发了后扣带回的活动,后扣带回在处理与食物相关的奖赏时尤为活跃。本研究结果揭示了后扣带回在儿童进食行为矫正中的重要性。值得注意的是,后扣带回是默认模式网络的中心节点,参与引导注意力和启动行为,已被确定为检测环境变化并激发行为转变的神经中枢。此外, Leech和Sharp认为,后扣带回在引导注意力焦点(进食体验、进食过程)和支持内部导向认知(奖赏状态、饱腹状态)方面起着至关重要的作用^[51]。后扣带回除了涉及对内部和外部线索的关注外^[59],还可以作为动机和空间注意之间的神经接口,并根据其他系统的输入(如,食物刺激)分配神经资源^[60,61],产生食物线索的注意力偏向,与儿童进食行为产生关联。

本研究发现了儿童慢食行为与身体质量指数之间的相关关系,并创新性地探讨了其脑结构关联,为预防儿童肥胖提供了新思路,为制定针对儿童肥胖问题的全面干预策略提供了实践指导。儿童期是形成饮食行为的关键时期,并且这种饮食行为具有持续性和稳定性,影响成年后的饮食习惯^[62]。儿童不良的进食行为会导致肥胖率的增加,进一步增加肥胖症患病率,而良好的进食行为有助于儿童保持健康的体重,这种益处将延续到成年及更长的生命范围^[63]。在肥胖预防策略和公共卫生实践中,缓慢进食是进食行为中潜在的重要因素,在生命早期调整进食速度可能比在中年期更有利于体重管理,预防糖尿病的发生和发展。一项针对4~8岁美国儿童的为期8周的干预性实验旨在通过营养教育、计时和与家人的互动来减缓进食速度,结果发现儿童进食速度降低并与较低的身体质量指数相关^[15]。在体重管理和干预措施中,降低肥胖儿童的进食速度也被视为减肥和减轻体重增加的有效工具^[15,64,65]。开发和测试非实验室的可扩展方法来改变儿童的餐内饮食行为,减缓整体进食速度是体重管理的潜在辅助手段,能够有效地预防肥胖症,促进儿童健康成长。

4 结论

儿童慢食行为对于肥胖的产生和发展具有重要影响,了解儿童的慢食行为特点及其脑机制对于儿童健康发展具有至关重要的作用。本研究结果表明,儿童慢食行为与身体质量指数、后扣带回皮层体积均存在负相关关系,后扣带回、舌回皮层体积与身体质量指数

正相关。除此之外, 儿童慢食行为与身体质量指数之间存在脑结构关联, 后扣带回皮层体积在二者之间存在中介作用。本研究进一步证实了脑区的视觉加工、奖赏和执行控制在慢食行为及肥胖中的重要作用, 舌回与大脑对食物线索的视觉处理和注意力分配有关, 后

扣带回具有重要的奖赏和执行控制功能。慢食行为的儿童检测进食过程达到饱腹状态, 适时停止进食行为, 而快速进食的儿童在进食体验带来的奖赏中忽视了饱腹信号, 往往与过度进食产生肥胖有关。因此, 倡导缓慢进食是儿童体重管理以及降低肥胖风险的有效策略。

参考文献

- 1 Jebeile H, Kelly A S, O'Malley G, et al. Obesity in children and adolescents: Epidemiology, causes, assessment, and management. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2022, 10: 351–365
- 2 Hong Y, Ullah R, Wang J B, et al. Trends of obesity and overweight among children and adolescents in China. *World J Pediatr*, 2023, 19: 1115–1126
- 3 Nuttall F Q. Body mass index: Obesity, BMI, and health: A critical review. *Nutr Today*, 2015, 50: 117–128
- 4 Kimin L S, Sat Lin C L, Avoi R, et al. Children's eating behaviour: A comparison between normal, overweight and obese children. *Ann Med Surg*, 2022, 84: 104890
- 5 Forde C G, van Kuijk N, Thaler T, et al. Texture and savoury taste influences on food intake in a realistic hot lunch time meal. *Appetite*, 2013, 60: 180–186
- 6 Karl J P, Young A J, Rood J C, et al. Independent and combined effects of eating rate and energy density on energy intake, appetite, and gut hormones. *Obesity*, 2013, 21: E244–E252
- 7 Carnell S, Wardle J. Appetite and adiposity in children: Evidence for a behavioral susceptibility theory of obesity. *Am J Clin Nutr*, 2008, 88: 22–29
- 8 Ekuni D, Furuta M, Takeuchi N, et al. Self-reports of eating quickly are related to a decreased number of chews until first swallow, total number of chews, and total duration of chewing in young people. *Arch Oral Biol*, 2012, 57: 981–986
- 9 Bolhuis D P, Lakemond C M M, de Wijk R A, et al. Both a higher number of sips and a longer oral transit time reduce ad libitum intake. *Food Qual Preference*, 2014, 32: 234–240
- 10 Hamada Y, Miyaji A, Hayashi Y, et al. Objective and subjective eating speeds are related to body composition and shape in female college students. *J Nutr Sci Vitaminol*, 2017, 63: 174–179
- 11 Yamane M, Ekuni D, Mizutani S, et al. Relationships between eating quickly and weight gain in Japanese university students: A longitudinal study. *Obesity*, 2014, 22: 2262–2266
- 12 Tanihara S, Imatoh T, Miyazaki M, et al. Retrospective longitudinal study on the relationship between 8-year weight change and current eating speed. *Appetite*, 2011, 57: 179–183
- 13 McGee T L, Grima M T, Hewson I D, et al. First Australian experiences with an oral volume restriction device to change eating behaviors and assist with weight loss. *Obesity*, 2012, 20: 126–133
- 14 Ochiai H, Shirasawa T, Ohtsu T, et al. The impact of eating quickly on anthropometric variables among schoolgirls: A prospective cohort study in Japan. *Eur J Public Health*, 2014, 24: 691–695
- 15 Faith M S, Diewald L K, Crabbe S, et al. Reduced eating pace (RePace) behavioral intervention for children prone to or with obesity: Does the turtle win the race? *Obesity*, 2019, 27: 121–129
- 16 Okubo H, Miyake Y, Sasaki S, et al. Rate of eating in early life is positively associated with current and later body mass index among young Japanese children: The Osaka maternal and child health study. *Nutr Res*, 2017, 37: 20–28
- 17 Sasaki S, Katagiri A, Tsuji T, et al. Self-reported rate of eating correlates with body mass index in 18-y-old Japanese women. *Int J Obes*, 2003, 27: 1405–1410
- 18 Robinson E, Almiron-Roig E, Rutters F, et al. A systematic review and meta-analysis examining the effect of eating rate on energy intake and hunger. *Am J Clin Nutr*, 2014, 100: 123–151
- 19 Berkowitz R I, Moore R H, Faith M S, et al. Identification of an obese eating style in 4-year-old children born at high and low risk for obesity. *Obesity*, 2010, 18: 505–512
- 20 Carnell S, Benson L, Pantazatos S P, et al. Amodal brain activation and functional connectivity in response to high-energy-density food cues in obesity. *Obesity*, 2014, 22: 2370–2378
- 21 Stanek K M, Grieve S M, Brickman A M, et al. Obesity is associated with reduced white matter integrity in otherwise healthy adults. *Obesity*, 2011, 19: 500–504
- 22 Syan S K, McIntyre-Wood C, Minuzzi L, et al. Dysregulated resting state functional connectivity and obesity: A systematic review. *Neurosci*

- BioBehav Rev, 2021, 131: 270–292
- 23 van der Laan L N, de Ridder D T D, Viergever M A, et al. The first taste is always with the eyes: A meta-analysis on the neural correlates of processing visual food cues. *Neuroimage*, 2011, 55: 296–303
- 24 Tang D W, Fellows L K, Small D M, et al. Food and drug cues activate similar brain regions: A meta-analysis of functional MRI studies. *Physiol Behav*, 2012, 106: 317–324
- 25 Herrmann M J, Tesar A K, Beier J, et al. Grey matter alterations in obesity: A meta-analysis of whole-brain studies. *Obesity Rev*, 2019, 20: 464–471
- 26 Volkow N D, Wang G J, Tomasi D, et al. Obesity and addiction: Neurobiological overlaps. *Obesity Rev*, 2013, 14: 2–18
- 27 Liu X, Turel O, Xiao Z, et al. Neural differences of food-specific inhibitory control in people with healthy vs higher BMI. *Appetite*, 2023, 188: 106759
- 28 Kishinevsky F I, Cox J E, Murdaugh D L, et al. fMRI reactivity on a delay discounting task predicts weight gain in obese women. *Appetite*, 2012, 58: 582–592
- 29 Donofry S D, Stillman C M, Erickson K I. A review of the relationship between eating behavior, obesity and functional brain network organization. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2020, 15: 1157–1181
- 30 Leech R, Braga R, Sharp D J. Echoes of the brain within the posterior cingulate cortex. *J Neurosci*, 2012, 32: 215–222
- 31 Meng X, Huang D, Ao H, et al. Food cue recruits increased reward processing and decreased inhibitory control processing in the obese/overweight: An activation likelihood estimation meta-analysis of fMRI studies. *Obesity Res Clin Pract*, 2020, 14: 127–135
- 32 Gao M, Xue K, Guo H. Reliability and validity study of the children's eating behavior questionnaire in Chinese school-age children. *J Nutr Sci Vitaminol*, 2020, 66: S82–S86
- 33 Destrieux C, Fischl B, Dale A, et al. Automatic parcellation of human cortical gyri and sulci using standard anatomical nomenclature. *NeuroImage*, 2010, 53: 1–15
- 34 Liu S, Wang Y S, Zhang Q, et al. Chinese Color Nest Project: An accelerated longitudinal brain-mind cohort. *Dev Cogn Neurosci*, 2021, 52: 101020
- 35 Yang N, He Y, Zhang Z, et al. Chinese Color Nest Project: Growing up in China. *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 3008–3022
- 36 Bedford S A, Lai M C, Lombardo M V, et al. Brain-charting autism and attention deficit hyperactivity disorder reveals distinct and overlapping neurobiology. medRxiv, 2023, 2023.12.06.23299587
- 37 Weltgesundheitsorganisation. Length/height-for-age, weight-for-age, weight-for-length, weight-for-height and body mass index-for-age methods and development. Geneva: WHO Press, 2006
- 38 Jackson R, Haszard J J, Morrison S, et al. Measuring short-term eating behaviour and desire to eat: Validation of the child eating behaviour questionnaire and a computerized 'desire to eat' computerized questionnaire. *Appetite*, 2021, 167: 105661
- 39 Fogel A, Goh A T, Fries L R, et al. Faster eating rates are associated with higher energy intakes during an *ad libitum* meal, higher BMI and greater adiposity among 4–5-year-old children: Results from the Growing Up in Singapore Towards Healthy Outcomes (GUSTO) cohort. *Br J Nutr*, 2017, 117: 1042–1051
- 40 Kokkinos A, le Roux C W, Alexiadou K, et al. Eating slowly increases the postprandial response of the anorexigenic gut hormones, peptide YY and glucagon-like peptide-1. *J Clin Endocrinol Metab*, 2010, 95: 333–337
- 41 Garcidueñas-Fimbres T E, Paz-Graniel I, Gómez-Martínez C, et al. Associations between eating speed, diet quality, adiposity, and cardiometabolic risk factors. *J Pediatr*, 2023, 252: 31–39.e1
- 42 Garcidueñas-Fimbres T, Paz-Graniel I, Nishi S, et al. Eating speed, eating frequency, and their relationships with diet quality, adiposity, and metabolic syndrome, or its components. *Nutrients*, 2021, 13: 1687
- 43 Okubo H, Murakami K, Masayasu S, et al. The relationship of eating rate and degree of chewing to body weight status among preschool children in Japan: A nationwide cross-sectional study. *Nutrients*, 2018, 11: 64
- 44 Kolay E, Bykowska-Derda A, Abdulsamad S, et al. Self-reported eating speed is associated with indicators of obesity in adults: A systematic review and meta-analysis. *Healthcare*, 2021, 9: 1559
- 45 Paz-Graniel I, Babio N, Mendez I, et al. Association between eating speed and classical cardiovascular risk factors: A cross-sectional study. *Nutrients*, 2019, 11: 83
- 46 Stopyra M A, Friederich H C, Lavandier N, et al. Homeostasis and food craving in obesity: A functional MRI study. *Int J Obes*, 2021, 45: 2464–2470
- 47 Luo S, Monterosso J R, Sarpelleh K, et al. Differential effects of fructose versus glucose on brain and appetitive responses to food cues and decisions for food rewards. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 6509–6514
- 48 Huerta C I, Sarkar P R, Duong T Q, et al. Neural bases of food perception: Coordinate-based meta-analyses of neuroimaging studies in multiple modalities. *Obesity*, 2014, 22: 1439–1446

- 49 Yuan Z, Wang W, Zhang X, et al. Altered functional connectivity of the right caudate nucleus in chronic migraine: A resting-state fMRI study. *J Headache Pain*, 2022, 23: 154
- 50 Raichle M E, MacLeod A M, Snyder A Z, et al. A default mode of brain function. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 676–682
- 51 Leech R, Sharp D J. The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain*, 2014, 137: 12–32
- 52 Siep N, Roefs A, Roebroek A, et al. Hunger is the best spice: An fMRI study of the effects of attention, hunger and calorie content on food reward processing in the amygdala and orbitofrontal cortex. *Behav Brain Res*, 2009, 198: 149–158
- 53 Pearson J M, Heilbronner S R, Barack D L, et al. Posterior cingulate cortex: Adapting behavior to a changing world. *Trends Cogn Sci*, 2011, 15: 143–151
- 54 Kable J W, Glimcher P W. The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nat Neurosci*, 2007, 10: 1625–1633
- 55 Sleddens E F, Kremers S P, Thijs C. The Children's eating behaviour questionnaire: Factorial validity and association with body mass index in Dutch children aged 6–7. *Int J Behav Nutr Phys Act*, 2008, 5: 49
- 56 Zahedi A, Artigas S O, Swaboda N, et al. Neural correlates of changing food choices while bypassing values. *NeuroImage*, 2023, 274: 120134
- 57 Simon J J, Skunde M, Wu M, et al. Neural dissociation of food- and money-related reward processing using an abstract incentive delay task. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2015, 10: 1113–1120
- 58 Simon J J, Skunde M, Walther S, et al. Neural signature of food reward processing in bulimic-type eating disorders. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2016, 11: 1393–1401
- 59 Lips M A, Wijngaarden M A, van der Grond J, et al. Resting-state functional connectivity of brain regions involved in cognitive control, motivation, and reward is enhanced in obese females. *Am J Clin Nutr*, 2014, 100: 524–531
- 60 Tregellas J R, Wylie K P, Rojas D C, et al. Altered default network activity in obesity. *Obesity*, 2011, 19: 2316–2321
- 61 Chen S, Dong D, Jackson T, et al. Altered frontal inter-hemispheric resting state functional connectivity is associated with bulimic symptoms among restrained eaters. *Neuropsychologia*, 2016, 81: 22–30
- 62 Stok F M, Renner B, Clarys P, et al. Understanding eating behavior during the transition from adolescence to young adulthood: A literature review and perspective on future research directions. *Nutrients*, 2018, 10: 667
- 63 Scaglioni S, De Cosmi V, Ciappolino V, et al. Factors influencing children's eating behaviours. *Nutrients*, 2018, 10: 706
- 64 Ford A L, Bergh C, Sodersten P, et al. Treatment of childhood obesity by retraining eating behaviour: Randomised controlled trial. *BMJ*, 2009, 340: b5388
- 65 Melanson K J, Matsumoto C N, Greene G W. Eating pace instruction is effective in slowing eating rate in women with overweight and obesity. *Eat Behav*, 2023, 48: 101701

Summary for “儿童慢食行为与身体质量指数的神经影像学关联: 基于中国儿童大脑结构常模的研究”

Neuroimaging association between children's slowness in eating and body mass index: A study based on Chinese children's brain structural norms

Enying Li^{1,2}, Dongtao Wei^{1,2}, Debo Dong^{1,2}, Xiao Gao^{1,2*} & Hong Chen^{1,2*}

¹ Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

² Key Laboratory of Cognition and Personality (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China

* Corresponding authors, E-mail: gaoxiaox@swu.edu.cn; chenhg@swu.edu.cn

The increasing rate of overweight and obesity among Chinese children poses risks to physical and mental health. Therefore, it is necessary to pay attention to the issue of childhood obesity and investigate the cognitive neural mechanisms of how children's eating behavior affects obesity. Slowness in eating is a potential key factor in children's dietary behavior that can help control their food intake. This practice not only enhances the feeling of fullness but also reduces energy intake, effectively preventing and improving obesity issues. The correlation between children's slowness in eating behavior and body mass index (BMI) involves complex brain associations, which have not been thoroughly explored in existing studies. This study innovatively interprets the association between children's slowness in eating and BMI from the perspectives of satiety and reward, and investigates the structural changes in the corresponding brain regions. In the study, 99 children aged 8.917–12.083 ($M_{\text{age}}=10.476$, $SD=0.855$) with a BMI ranging from -2.687 – 3.339 ($M_{\text{BMI}}=0.577$, $SD=1.328$) were selected. Children's slow eating behavior was measured through the slowness in eating dimension of the Children's Eating Behavior Questionnaire. Brain imaging data were collected using a magnetic resonance imaging scanner to obtain cortical volume of brain regions, which were then mapped onto the Chinese children's brain volume norms to derive the relative position parameters of individual brain region volumes within those norms. The results of the correlation analysis indicated that BMI was negatively correlated with slowness in eating ($r=-0.383$, $P<0.001$), and positively correlated with lingual gyrus volume ($r=0.304$, $P=0.002$) and posterior cingulate cortex volume ($r=0.392$, $P<0.001$). Slowness in eating was negatively correlated with posterior cingulate cortex volume ($r=-0.221$, $P=0.028$). The mediating model indicated that the volume of the posterior cingulate cortex had a mediating effect between slowness in eating and body mass index in children, with a mediation effect value of -0.088 . The robust correlation between the volumes of the lingual gyrus and the posterior cingulate cortex with BMI elucidates the pivotal influence of visual processing, reward anticipation, and executive control on both the modulation of slowness in eating and the development of obesity. Posterior cingulate cortex plays an important role in reward and executive control functions, guiding attention focus (eating experience, eating process), and supporting internally guided cognition (reward state, satiety state). Children with slowness in eating can perceive the eating process, recognize satiety signals, and stop eating behavior in a timely manner, whereas children who eat quickly often overlook satiety signals in the rewarding eating experience, which is often associated with overeating and obesity. This study provides robust evidence of the brain structural basis for children's slow eating behavior and body mass index, and offers theoretical reference for improving the problem of childhood obesity by starting with slowing down the pace of eating during meals.

children, slowness in eating, posterior cingulate cortex, lingual gyrus, body mass index, magnetic resonance imaging

doi: [10.1360/TB-2024-0380](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0380)