

影响饱腹感的成分及其生理功能的研究进展

刘爽¹, 彭依晴¹, 杜晨阳², 董娟娥¹, 梁宗锁^{1,3*}

(1. 西北农林科技大学生命科学学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学化药与药学院, 杨凌 712100;
3. 浙江理工大学生命科学与医药学院, 杭州 310018)

摘要: 饱腹感是指在人体摄入一定量的食物后, 心理上或生理上对更多食物的摄入没有欲望的一种状态, 而摄入一些含有膳食纤维、抗性淀粉、蛋白质的食物后会产生强烈饱腹感, 能够有效减少能量摄入, 同时能够促进与饱腹感信号传导密切相关的生理指标的分泌, 并对肥胖、糖尿病、冠心病等疾病有预防作用, 但是人们却对其中的机制了解甚少。本文主要对人体饱腹感产生机制、产生饱腹感的物质种类及其生理功能进行论述, 旨在为人类健康饮食和预防疾病的研究提供思路。

关键词: 饱腹感; 膳食纤维; 抗性淀粉; 生理功能

Research progress on components affecting satiety and their physiological functions

LIU Shuang¹, PENG Yi-Qing¹, DU Chen-Yang², DONG Juan-E¹, LIANG Zong-Suo^{1,3*}

(1. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Chemistry & Pharmacy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. College of Life Sciences and Medicine, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: Satiety refers to a state in which the human body has no desire for more food psychologically or physiologically after ingesting a certain amount of food. However, after ingesting some foods containing dietary fiber, resistant starch and protein, it will produce a strong sense of satiety, which can effectively reduce energy intake and promote the secretion of physiological indicators closely related to satiety signal transduction, it also plays a preventive role in obesity, diabetes, coronary heart disease and other diseases, however, little is known about its mechanism. This paper mainly summarized the mechanism of human satiety, the types of substances that produced satiety and their physiological functions, in order to provide ideas for the research of human healthy diet and disease prevention.

KEY WORDS: satiety; dietary fiber; resistant starch; physiological functions

0 引言

近几十年来, 随着我国经济快速发展, 我国居民生活水平不断提高, 食物类型也由单一型向多元化方向发展。

但是不合理的膳食结构导致人们饮食过量, 营养过剩引发的严重健康问题, 如肥胖症、糖尿病、高脂血症、高血压病等疾病的患病率日益增多。有效控制食物摄入量有利于人们维持身体健康, 也是近年来的研究热点。

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2017C02034)、浙江省基础公益研究计划项目(LGN21C020008)、山东省重点攻关项目(S190002030001)

Fund: Supported by the Key Research and Development Program Project from Zhejiang Province (2017C02034), the Basic Public Welfare Research Plan of Zhejiang Province (LGN21C020008), and the Key Tackle Program of Shandong Province (S190002030001)

*通信作者: 梁宗锁, 教授, 主要研究方向为中草药规范化栽培的理论与技术研究。E-mail: liangzs@zstu.edu.cn

*Corresponding author: LIANG Zong-Suo, Professor, College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China. E-mail: liangzs@zstu.edu.cn

食物摄入总量直接或间接受到自身食欲、对食物种类偏好及外界刺激的影响。增强人体自身饱腹感能够有效控制食物摄入量。膳食纤维、抗性淀粉和蛋白质等物质能够促使人体产生饱腹感,减少过多食物的摄入^[1-2]。同时这些物质进入人体后具有改善肠道蠕动、降血糖、降血脂等功能,近年来逐渐受到人们的广泛关注。本文综述了人体饱腹感的产生机制、产生饱腹感的成分(膳食纤维、抗性淀粉、蛋白质)及其生理功能研究,为开发高饱腹感食品、构建合理饮食和预防肥胖症、糖尿病等疾病提供理论基础。

1 饱腹感产生的机制

食物的摄入是一种受到神经和代谢控制的行为,人们通过对周围食物的感知和体内产生的饥饿和饱腹状态来调节食物的摄入。目前已经明确位于下丘脑弓状核(hypothalamic arcuate nucleus, ARC)中的刺鼠相关蛋白(agouti-related peptide, AGRP)和阿黑皮素原(pro-opiomelanocortin, POMC)神经元的表达分别会对摄食行为产生积极和消极的影响;AGRP和一种共同表达的肽,神经肽Y(neuropeptide Y, NPY),在注入大脑时会增加食物摄入;而缺乏食物的小鼠脑切片中的AGRP神经元放电率升高^[3]。与之相反,遗传和药理学证据表明,POMC神经元通过释放 α -黑素细胞刺激素(一种黑素皮质素受体激动剂)来抑制摄食^[4]。此外,对于脊椎动物和昆虫,食物摄取的优化需要严格调控胃肠对饥饿状态的反应和对食物质量的感知,一旦食物被摄入,需要一定的时间感知胃肠中的食物质量和饥饿状态,进而调节进食行为^[5-7]。因此,食物在机体中产生的饱腹感主要由胃肠调控。例如,有些食物(如膳食纤维、抗性淀粉等)可通过咀嚼和分泌唾液使机体产生饱腹感;或者进入胃部后的食物吸水膨大,聚集成凝胶态团状物,使其体积增大以及粘度增加而减慢其他营养物质的吸收而引起饱腹感^[8-11];还可通过微生物分解产生短链脂肪酸(short chain fatty acids, SCFAs),随后SCFAs进入到细胞中,在塑造微生物生态系统和宿主健康方面发挥着重要作用^[12-14]。许多生理指标[酪肽肽(peptide YY, PYY)、胰高血糖素样肽(glucagon-like-peptide-1, GLP-1)、胰岛素(insulin, INS)、瘦素(leptin, LEP)、胆囊收缩素(cholecystokinin, CCK)]也与饱腹

感信号传导密切相关(见表 1)。机体内的胰岛素和瘦素水平显著升高可以降低摄食量。瘦素主要与肥胖的预防相关,而胰岛素主要与糖尿病的预防相关。胰岛素可通过调节中枢神经系统降低食物摄入量,有效降低血糖且不引起饥饿感^[15]。胃肠道分泌的PYY、CCK和GLP-1等物质可进行短期食欲调节,使机体产生饱腹感而终止进食。研究发现大鼠体内微量注射PYY₁₋₃₆后刺激Y2R(Y2 receptor)信号通路,有效减少大鼠摄食量^[16];GLP-1能够刺激胰岛素分泌,抑制胰高血糖素分泌和胃排空,增加饱腹感^[17];CCK也通过抑制胃排空刺激饱腹感的信号产生^[18]。

总之,在大脑中,食物的感觉信号与新陈代谢的结果联系在一起,影响着人们的饮食习惯(营养结构)^[19]。此外,认知因素对饮食习惯也有影响。这些因素共同影响着人们对食物的摄入以及饱腹感的产生^[20]。除感觉信号、代谢和认知因素外,饱腹感的产生还受其他因素的影响,如食品的营养成分、密度、风味、口感、外观等。

2 影响饱腹感的成分

2.1 膳食纤维

膳食纤维是一类能在人体大肠中全部或部分发酵,在小肠中不被消化吸收的可食用物质,包括寡糖、多糖、木质素及其他物质^[21]。膳食纤维作为第七大营养素,广泛存在于植物中。根据其溶解性的不同,分为不可溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)与可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)。IDF包括木质素和纤维素等,SDF包括瓜尔胶、卡拉胶、果胶、 β -葡聚糖和葡甘聚糖等。

膳食纤维能够在消化道内形成粘液,阻止小肠中内容物与消化酶接触,导致消化吸收时间增加。燕麦中含有大量的膳食纤维。摄入等量大米和燕麦代餐粉后发现,受试者食用燕麦代餐粉产生的饱腹感强于大米,且随着燕麦摄入量增加,饱腹感逐渐增强^[22]。

无论是IDF还是SDF都广泛应用于食品中,包括增稠剂、乳化剂、持水剂、凝胶剂、发酵剂、保湿剂、悬浮剂、分散剂等(见表 2)。除此之外,膳食纤维也是一些中草药的活性成分,如豆科植物黄芪的干燥胶状分泌物——黄芪胶、决明子的胚乳中的决明胶以及车前草中的车前草胶等,这些化学成分对高血糖高血脂有明显的降低作用^[27-28]。

表 1 饱腹感相关的生理指标
Table 1 Physiological indexes related to satiety

生理指标	分泌来源	食欲调控信号	食欲调控作用	产生饱腹感原理
酪酪肽(PYY)	L 细胞	胃肠道饱腹信号	短期	抑制胃酸分泌及胃排空
胰高血糖素样肽(GLP-1)	L 细胞	胃肠道饱腹信号	短期	抑制餐后肠胃消化
胆囊收缩素(CCK)	I 细胞	胃肠道饱腹信号	短期	抑制胃排空
胰岛素(INS)	胰岛	脂肪信号	长期	降低食欲,促进能量消耗
瘦素(LEP)	脂肪组织	脂肪信号	长期	减少摄食

2.2 淀粉

人类膳食中主要的碳水化合物是淀粉(starch), 分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 。根据淀粉在肠胃中消化分解速率的不同分成 3 类, 分别为缓慢消化淀粉(slowly digested starch, SDS)、快速消化淀粉(rapid digested starch, RDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)^[33]。抗性淀粉不能被人类小肠消化分解, 但可以在大肠中发酵成脂肪酸^[34]。根据其来源以及在小肠中的抗酶解特性分为物理包埋淀粉(RS1)、天然抗性淀粉颗粒(RS2)、老化淀粉(RS3)、化学改性淀粉(RS4)^[35]。近年来, 研究者发现一种新型抗性淀粉, 即直链淀粉-脂肪复合淀粉(RS5)^[36-37](见表 3)。

抗性淀粉既属于多糖, 又属于一类新型的膳食纤维, 通过在小肠中的抗消化以及在大肠中发酵产生代谢产物

发挥作用。研究发现, 抗性淀粉主要可通过降低能量摄入、促进脂肪分解和增强饱腹感来控制体重, 以达到预防肥胖的目的。抗性淀粉在人体内难以水解成葡萄糖, 因此产生的能量极低, 当食入含有抗性淀粉的食物后, 体内的 PYY 和 GLP-1 等激素的分泌水平增高, 使人体饱腹感增强^[38]。

2.3 蛋白质

蛋白质是生命的物质基础, 广泛存在于日常食物中, 包括鸡蛋、牛奶、大豆、鸡鸭鱼肉、海参鲍鱼等^[39]。其中蛋白质含量最多的是大豆, 高达 30%~40%; 由于牛奶中水分含量高, 所以牛奶中蛋白质含量仅有 3%(见表 4)。蛋白质的营养成分高, 通过人体肠道消化吸收所产生的高能量增加机体饱腹感。

表 2 膳食纤维的种类
Table 2 Types of dietary fibers

膳食纤维类型	来源	功能	食品上的应用
可溶性膳食纤维			
果胶	柑橘类、苹果的细胞壁	降血脂、抑菌、抗肿瘤、预防癌症等 ^[23]	凝胶剂、乳化剂、增稠剂
车前子胶	车前草	调血脂降血糖、增强免疫等 ^[24]	增稠剂、稳定剂、胶凝剂、粘结剂
瓜尔胶	瓜尔豆	降血糖、降血脂、预防心脏病及结肠癌等 ^[25]	增稠剂、持水剂、乳化剂
卡拉胶	红藻类海藻	降血脂、增加钙吸收等 ^[26]	增稠剂、稳定剂、悬浮剂、分散剂
黄芪胶	黄芪	免疫调节 ^[27]	增稠剂
决明胶	决明子	降血压、降血脂、明目保肝等 ^[28]	增稠剂
β -葡聚糖	燕麦	降血糖、降血脂、调节免疫、促进肠道益生菌群增值等 ^[29]	发酵剂
葡甘聚糖	魔芋	治疗糖尿病、肥胖、冠心病、中风、高脂血症、高胆固醇血症、甲状腺功能亢进症、结肠直肠癌等 ^[30]	增稠剂、稳定剂、保湿剂
不可溶性膳食纤维			
纤维素	植物的细胞壁	促进肠胃蠕动 ^[31]	食品包装
木质素	植物的细胞壁	预防癌症、降血糖 ^[32]	乳化剂

表 3 抗性淀粉的种类
Table 3 Types of resistant starches

抗性淀粉类型	消化速度	特点	抗性成因	食物来源
RS1 型	速度慢, 部分被消化	包埋于食物基质中	天然抗性	初级研磨的稻谷、豆类等
RS2 型	速度非常慢, 极少部分被消化, 煮熟后可完全被消化	具有天然结晶结构	天然抗性	生马铃薯、青香蕉和高直链玉米淀粉
RS3 型	速度慢, 部分被消化, 消化可逆	稳定性高	后天抗性	冷米饭、冷面包和一些油炸食品
RS4 型	抗水解	高抗性	后天抗性	具有变性纤维的功能性食品
RS5 型	速度慢, 部分被消化	易于回生	天然抗性	含有淀粉和脂质的谷物和食品

表 4 富含蛋白质的食物
Table 4 Foods rich in protein

食物种类	蛋白质含量/%	食物种类	蛋白质含量/%
鸡蛋	13	瘦羊肉	20
牛奶	3	虾肉	16~23
大豆	30~40	鱼肉	15~22
鸡肉	20	鲍鱼	12.6
鸭肉	16	海参	16.5
瘦猪肉	20	黄花鱼	17.7
瘦牛肉	>20		

2.4 其他成分

除了膳食纤维、淀粉、蛋白质之外,食物中的脂肪和碳水化合物也是人体摄入能量的来源。研究发现,高脂肪含量的食物比高碳水化合物的食物能够产生更多的能量,但过量摄入易引起肥胖^[40]。

3 饱腹感成分的生理功能

3.1 降血糖降血脂作用

目前,产生饱腹感的成分降血糖降血脂机制研究的最多。研究发现膳食纤维降血糖机制^[23,41]一般分为 5 个方面:(1)膳食纤维可将消化道内容物吸附住,阻止葡萄糖消化;(2)降低肠道消化酶活性;(3)使机体产生饱腹感,降低对食物的需求欲望;(4)增加机体对胰岛素的敏感性;(5)增加肝脏相关酶活性。降血脂机制能够增加肠道粘度,阻碍脂肪吸收,或者促进胆汁酸的排泄,吸收多余的甘油三酯和胆固醇。金文筠^[42]发现藕节中的膳食纤维能够预防小鼠肥胖,并通过从体外对胆固醇的吸附的角度以及对胰脂酶的吸附和活性影响研究藕节 SDF 的降脂机制。结果表明,SDF1 和 SDF2 对胆固醇的吸附能力较强,且 SDF1 和 SDF2 对未吸附的和吸附的胰脂酶均有明显的抑制作用。

抗性淀粉食入后能够延缓体内血糖上升,降低血脂含量,促进胰岛素分泌以及改善胰岛素抵抗。赵云龙等^[43]发现,相比于高脂对照组大鼠,抗性淀粉组的大鼠肝细胞排列整齐,脂肪组织含量少,同时大鼠血清中谷草转氨酶(aspartate transaminase, AST)、谷丙转氨酶(alanine transaminase, ALT)、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)的活力均恢复到正常水平,表明抗性淀粉能够降低高脂血症大鼠的肝损伤,可用于延缓或预防肥胖引起的肝脏疾病。MENG 等^[44]连续 12 周用高 RS、低蛋白面粉投喂小鼠,结果发现高 RS、低蛋白面粉干预改善了血糖和血脂水平,降低了血清尿酸(uric acid, UA)和尿液 $\beta 2$ 微球蛋白($\beta 2$ -MG),增强了早期糖尿病患者预防抗氧化应激的能力。

此外,经常饮用牛奶和乳制品可以降低肥胖和 2 型糖

尿病的风险。膳食研究明确表明,年轻人食用牛奶和高血糖的即食早餐谷物,或者老年人食用奶酪、酸奶配吐司和果酱,与单独饮用碳水化合物相比,餐后血糖明显降低^[45]。乳清蛋白和酪蛋白对饱腹感机制和餐后血糖水平的影响各不同,并且与肥胖和 2 型糖尿病有关。KUNG 等^[46]探讨了酪蛋白/乳清蛋白比例及与谷物共同食用的牛乳中总蛋白含量对饱腹感、餐后血糖和进食量的影响,结果发现,高蛋白(9.3%)处理降低了血糖水平和曲线下面积增值(incremental area under the curve, iAUC),以及午餐后食欲水平和曲线下总面积(total area under the curve, tAUC)。40:60 的蛋白质比例降低午餐前血糖水平,但不会降低 iAUC; 80:20 的蛋白质比例可以降低午餐前食欲水平,但不会降低 tAUC。因此,高蛋白膳食能够提高饱腹感、减少能量摄入。

3.2 改善肠道蠕动

肠道微生物在宿主代谢和健康中起着关键作用,这表明肠道细菌和人类疾病之间存在过多联系的可能性。而膳食纤维和抗性淀粉的摄入能够预防肠道疾病。比如,膳食纤维能被肠道微生物水解成丁酸,并减弱右旋糖酐脂诱导的小鼠结肠炎^[47]。随后,又有研究者提出膳食纤维预防结肠炎主要分为 3 步。第一,膳食纤维在小肠中抵抗消化,进入肠道发酵后产生的 SCFAs 可以提高肠道微生物群的健康组成;第二,SCFAs 具有抗癌特性,包括促进癌细胞周期阻滞、凋亡、抑制慢性炎症过程和癌症;第三,膳食纤维增加粪便的膨胀度和粘度,降低导致有害物质的蛋白质水解发酵的时间,并缩短潜在致癌物质和粘膜细胞之间的接触^[48]。膳食纤维还可结合/排泄潜在的腔内致癌物(如次生胆汁酸),降低结肠粪便 pH,从而提供健康的肠道环境。

此外,抗性淀粉具有改善肠道蠕动、增强人体对无机盐和矿物元素等物质的吸收以及及时排除体内有害物质的作用,可维持肠道健康。抗性淀粉在肠道内可分解产生具有抗炎作用的 SCFAs,具有预防肠道疾病的作用。此外,SCFAs 能够显著降低肠道内的 pH,促进矿物元素溶解,或者通过加快肠道上皮细胞的增殖使肠壁扩大,增强吸收矿物元素和无机盐的表面积促进吸收。抗性淀粉摄入后的人体实验表明,肠道微生物能促进乙酸、丙酸和丁酸等 SCFAs 的产生,并使肠道 pH 下降,使有益菌开始富集,与有害菌竞争并抑制其生长繁殖,阻碍有害物质的代谢,从而降低和预防 2 型糖尿病、肠道疾病和癌症等疾病的发病风险^[49]。LOPEZ 等^[50]通过研究发现,食用含有抗性淀粉后的大鼠均出现盲肠肥大和 SCFAs 积累(尤其是丙酸和丁酸),且 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收率也明显增加。

3.3 其他生理功能

除了调节血糖血脂、防治肠道疾病外,膳食纤维对癌症、冠心病、肥胖等还有预防作用。冠心病的发生与胆固醇密切相关,小鼠摄入膳食纤维后,小鼠脏器指数及小鼠

体重显著降低。此外, 人体中与脂质代谢相关的指标, 如血清和肝脏低密度脂蛋白-胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)水平会降低, 而高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)水平上升, 表明膳食纤维具有降血脂预防冠心病的作用^[51]。还有研究人员对 1367 人连续观察 5 年, 发现来源于生活中的各种食物, 比如谷物和蔬菜水果中的膳食纤维能够显著抑制胰腺癌发生率, 且胰腺癌的发生率与膳食纤维的摄入量成反比关系^[52]。袁萃等^[53]将适量的魔芋葡甘聚糖加在肥胖者的饮食中, 结果表明, 摄入含有葡甘聚糖的食物能够引起体重下降。万仁口等^[54]发现竹笋的总膳食纤维(total dietary fiber, TDF)、SDF 和 IDF 对 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS] 自由基和 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基都有清除作用, 但三者的抗氧化能力为 SDF>TDF>IDF。

4 结束语

摄食是影响人们在短期内能量获取的重要因素。人体摄入高饱腹感的食物后, 通过大脑感觉信号与代谢调节相联系产生饱腹感, 从而减低其他食物摄入量。能够产生高饱腹感的成分有膳食纤维、抗性淀粉、蛋白质、脂肪及碳水化合物, 而过量摄入脂肪及碳水化合物易引起肥胖等疾病; 但膳食纤维、抗性淀粉及蛋白质不仅能够刺激产生饱腹感信号, 减缓肠道消化速度, 而且还有降血糖、降血脂等药理作用。此外, 由于现代生活水平日渐提升, 人们对食物的要求也逐渐提高, 营养摄入过剩所引起的肥胖、肠道疾病、糖尿病和冠心病等疾病发病率逐年增加, 膳食纤维、抗性淀粉等高饱腹感成分在新型健康低脂食品(如代餐粉、代餐饼干等)的开发研究方面具有重要作用。

参考文献

- [1] DAHL WJ, STEWART ML. Position of the academy of nutrition and dietetics: Health implications of dietary fiber [J]. *J Acad Nutr Diet*, 2015, 115(11): 1861-1870.
- [2] POUTANEN KS, PIERRE D, ALFRUN E, *et al.* A review of the characteristics of dietary fibers relevant to appetite and energy intake outcomes in human intervention trials [J]. *Am J Clin Nutr*, 2017, (15): 71-72.
- [3] APONTE Y, ATASOY D, STERNSON SM. AGRP neurons are sufficient to orchestrate feeding behavior rapidly and without training [J]. *Nat Neurosci*, 2011, 14(3): 351-355.
- [4] YASWEN L, DIEHL N, BRENNAN MB, *et al.* Obesity in the mouse model of pro-opiomelanocortin deficiency responds to peripheral melanocortin [J]. *Nat Med*, 1999, 5: 1066-1070.
- [5] MIYAMOTO T, SLONE J, SONG X, *et al.* A fructose receptor functions as a nutrient sensor in the drosophila brain [J]. *Cell*, 2012, 5(151):

- 1113-1125.
- [6] ZUKERMAN S, ACKROFF K, SCLAFANI A. Rapid post-oral stimulation of intake and flavor conditioning by glucose and fat in the mouse [J]. *Am J Physiol Reg-I*, 2011, 301(6): 1635-1647.
- [7] DUS M, LAI SY, GUNAPALA KM, *et al.* Nutrient sensor in the brain directs the action of the brain-gut axis in drosophila [J]. *Neuron*, 2015, 87(1): 139-151.
- [8] SWOBODA C, TEMPLE JL. Acute and chronic effects of gum chewing on food reinforcement and energy intake [J]. *Eat Behav*, 2013, 14(2): 149-156.
- [9] STEINGOETTER A, BUETIKOFER S, CURCIC J, *et al.* The dynamics of gastric emptying and self-reported feelings of satiation are better predictors than gastrointestinal hormones of the effects of lipid emulsion structure on fat digestion in healthy adults-abayesian inference approach [J]. *J Nutr*, 2017, 147(4): 706-714.
- [10] VUKSAN V, PANAH S, LYON M, *et al.* Viscosity of fiber preloads affects food intake in adolescents [J]. *Nutr Metab Cardiovas*, 2009, 19(7): 498-503.
- [11] ALLAN G, CHARLOTTE LG, RONI AF, *et al.* Effects of oatmeal and corn flakes cereal breakfasts on satiety, gastric emptying, glucose, and appetite-related hormones [J]. *Ann Nutr Metab*, 2015, 66(2-3): 93-103.
- [12] HAN M, LIU P, LI D, *et al.* Dietary fiber gap and host gut microbiota [J]. *Protein Peptide Lett*, 2017, 24(999): 388-396.
- [13] ARA K, FILIPE DV, PETIA KD, *et al.* From dietary fiber to host physiology: Short-chain fatty acids as key bacterial metabolites [J]. *Cell*, 2016, 165(6): 1332-1345.
- [14] 颜玲. 膳食纤维功能特性评价及纤维素分子量对肠道菌群影响的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
YAN L. Assessment of biological functional properties of dietary fiber and research on the influences of cellulose with molecular weight on gut microbiota [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [15] 陈文雅. 食欲的调控机理及膳食蛋白对其产生的影响[J]. *现代食品*, 2017, (20): 72-77.
CHEN WY. Appetite regulation mechanism and the involvement of dietary protein [J]. *Mod Food*, 2017, (20): 72-77.
- [16] 薛秀菊, 聂文波, 冷慧, 等. 下丘脑弓状核 PYY 对大鼠摄食、胃运动和能量代谢的影响及潜在机制研究[J]. *现代生物医学进展*, 2019, 19(21): 4020-4025.
XUE XJ, NIE WB, LENG H, *et al.* Effects of hypothalamic ARC PYY on the feeding, gastric motility and energymetabolism in rats and its potential mechanism [J]. *Progress Mod Biomed*, 2019, 19(21): 4020-4025.
- [17] BEGLINGER C, DEGEN L. Gastrointestinal satiety signals in humans--physiologic roles for GLP-1 and PYY? [J]. *Physiol Behav*, 2006, 89(4): 460-464.
- [18] OVERDUIN J, GIBBS J, CUMMINGS DE, *et al.* CCK-58 elicits both satiety and satiation in rats while CCK-8 elicits only satiation [J]. *Peptides*, 2014, 54: 71-80.
- [19] JOHN B, CEES DG, TOINE H, *et al.* Appetite control: Methodological aspects of the evaluation of foods [J]. *Obes Rev*, 2010, 11(3): 251-270.
- [20] MORTON GJ, MEEK TH, SCHWARTZ MW. Neurobiology of food intake in health and disease [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2014, 15(6): 367-378.
- [21] DEVRIES JW, CAMIRE ME, CHO S, *et al.* The definition of dietary fiber [J]. *Cere Food World*, 2001, 46(3): 112-129.

- [22] 任向楠, 周瑾, 何梅, 等. 燕麦配方代餐粉对成人的饱腹感影响研究[J]. 营养学报, 2020, 42(2): 115–121.
REN XN, ZHOU J, HE M, *et al.* Study on the satiety of oat-based meal replacement in healthy adults [J]. Acta Nutr Sin, 2020, 42(2): 115–121.
- [23] 刘少阳, 卢培培, 李育铠, 等. 果胶的功能特性及其应用研究进展[J]. 农产品加工, 2020, (9): 60–63.
LIU SY, LU PP, LI YK, *et al.* Research progress on functional properties and application of pectin [J]. Farm Prod Process, 2020, (9): 60–63.
- [24] 张君, 徐志立, 张振秋. 车前子胶对免疫功能低下小鼠免疫功能的影响[J]. 辽宁中医杂志, 2018, 45(9): 1965–1967.
ZHANG J, XU ZL, ZHANG ZQ. Experimental research of plantasan on immunological function in immunocompromised mice [J]. Liaoning J Tradit Chin Med, 2018, 45(9): 1965–1967.
- [25] 周姗姗. 瓜尔胶对木薯淀粉消化性的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
ZHOU SS. Study on the influence of guar gum on the digestibility of tapioca starch [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [26] 肖玉斌. 卡拉胶的提取及其复合气凝胶的制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
XIAO YB. Study on the extraction of carrageenan and the preparation and properties of its composite aerogels [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [27] HAMED I A, YOUSEFI G, FARJADIAN S, *et al.* Physicochemical and immunomodulatory properties of gum exudates obtained from *Astragalus myriacanthus* and some of its isolated carbohydrate biopolymers [J]. Iran J Pharm Res, 2017, 16(4): 1520–1530.
- [28] 李亦. 决明胶提取、分离工艺及应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
LI Y. Studies on extraction, isolation and application of *Cassia* gum [D]. Fujzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [29] 秦英英. 燕麦 β -葡聚糖的化学改性及其生理活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
QING YY. Chemical modification and physiological activity of oat β -glucan [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [30] 谭燕, 刘曦, 袁芳. 魔芋葡甘聚糖的结构、性质及其在食品中的应用[J]. 中国调味品, 2019, 44(2): 168–174.
TAN Y, LIU X, YUAN F. Structure, properties of konjac glucomannan and its application in food industry [J]. Chin Cond, 2019, 44(2): 168–174.
- [31] 刘翌. 纤维素的改性及其电流变性能的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
LIU Z. Modification to cellulose and their electrorheological properties [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2018.
- [32] 王庆福, 黄清铎, 梁磊, 等. 灵芝木质素降解酶研究及其潜在应用进展[J]. 热带作物学报, 2015, 36(7): 1361–1367.
WANG QF, HUANG QH, LIANG L, *et al.* Research progress and potential application of ligninolytic enzymes from *Ganoderma* spp. [J]. Chin J Trop Crop, 2015, 36(7): 1361–1367.
- [33] 王怡, 陈祖琴, 李萍, 等. 抗性淀粉的制备、生理功能及应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 396–400.
WANG Y, CHEN ZQ, LI P, *et al.* Preparation and physiological function of resistant starch and its application [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(2): 396–400.
- [34] 林杨. 抗性淀粉的制备工艺及其发酵特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
LIN Y. Research of processing technology and fermentation characteristics of resistant starch [D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2008.
- [35] 王琦. 莲子抗性淀粉降血糖功效及其机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
WANG Q. Study on the hypolipidemic effect of lotus seed resistant starch and its mechanism [D]. Fujzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [36] GODERIS B, PUTSEYS JA, GOMMES CJ, *et al.* The structure and thermal stability of amylose-lipid complexes: A case study on amylose-glycerol monostearate [J]. Cryst Grow Des, 2014, 14(7): 3221–3233.
- [37] HASJIM J, LEE SO, HENDRICH S, *et al.* Characterization of a novel resistant-starch and its effects on postprandial plasma-glucose and insulin responses [J]. Cere Chem, 2010, 87(4): 257–262.
- [38] 胡珍珍, 郝宗山, 孟妍, 等. 抗性淀粉的制备、功效及应用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(1): 30–35.
HU ZZ, HAO ZS, MENG Y, *et al.* Preparation, efficacy and application of resistant starch [J]. Food Nutr Chin, 2021, 27(1): 30–35.
- [39] 王竹, 高超, 邢青斌. 优质蛋白质食物风云榜出炉[J]. 食品界, 2020, (8): 80–81.
WANG Z, GAO C, XING QB. The list of high-quality protein foods [J]. Food Ind, 2020, (8): 80–81.
- [40] GREEN SM, WALES JK, LAWTON CL, *et al.* Comparison of high-fat and high-carbohydrate foods in a meal or snack on short-term fat and energy intakes in obese women [J]. Brit J Nutr, 2000, 84(4): 521–530.
- [41] 章瑜. 膳食纤维对II型糖尿病大鼠的血糖影响及机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
ZHANG Y. The mechanism research on dietary fiber in lowering blood glucose in T2DM mice [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [42] 金文筠. 藕节膳食纤维制备及其控制体重研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
JIN WJ. Study on adsorption of pancreatic lipase and cholesterol by soluble dietary fiber of modified lotus root nodes [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [43] 赵云龙, 苏哲, 周中凯. RS4型抗性淀粉对高脂饮食大鼠肝功能代谢紊乱的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(2): 37–40.
ZHAO YL, SU Z, ZHOU ZK. Effect of RS4-type resistant starch on the metabolic disorders of liver function of high fat diet-fed rats [J]. J Cere Oils, 2018, 31(2): 37–40.
- [44] MENG Y, BAI H, YU QT, *et al.* High-resistant starch, low-protein flour intervention on patients with early type 2 diabetic nephropathy: A randomized trial [J]. J Ren Nutr, 2019, 29(5): 386–393.
- [45] LAW M, HOUT PSP, LEE YT, *et al.* The effect of dairy and non-dairy beverages consumed with high glycemic cereal on subjective appetite, food intake and post-prandial glycemia in young adults [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2017, (11): 1201–1209.
- [46] KUNG B, ANDERSON GH, PARE S, *et al.* Effect of milk protein intake and casein-to-whey ratio in breakfast meals on postprandial glucose, satiety ratings, and subsequent meal intake [J]. J Dairy Sci, 2018, 101(10): 8688–8701.
- [47] BERNDT BE, ZHANG M, OWYANG SY, *et al.* Butyrate increases IL-23 production by stimulated dendritic cells [J]. Am J Physiol-Gastr Liver,

- 2012, 303(12): 1384–1392.
- [48] ZENG H, LAZAROVA DL, BORDONARO M. Mechanisms linking dietary fiber, gut microbiota and colon cancer prevention [J]. *World J Gastro Oncol*, 2014, (2): 41–51.
- [49] ZHAO L, ZHANG F, DING X, *et al.* Gut bacteria selectively promoted by dietary fibers alleviate type 2 diabetes [J]. *Science*, 2018, 359(6380): 1151–1156.
- [50] LOPEZ HW, MARIE-ANNE LV, CHARLES C, *et al.* Class 2 resistant starches lower plasma and liver lipids and improve mineral retention in rats [J]. *J Nutr*, 2001, (4): 1283.
- [51] TONG L, ZHONG K, LIU L, *et al.* Effects of dietary hull-less barley β -glucan on the cholesterol metabolism of hypercholesterolemic hamsters [J]. *Food Chem*, 2015, 169: 344–349.
- [52] RICK JJ, DENNIS PR, RACHAEL ZS, *et al.* Fruit and vegetable consumption is inversely associated with having pancreatic cancer [J]. *Cancer Cause Control*, 2011, 22(12): 1613–1625.
- [53] 袁萍, 吴平. 魔芋膳食纤维生物活性研究进展[J]. *农产品加工*, 2015, (10): 65–67.
- YUAN P, WU P. Biological activity of konjac dietary fiber [J]. *Farm Prod Process*, 2015, (10): 65–67.

- [54] 万仁口, 贺杨正, 李功景, 等. 酶解制备竹笋可溶性膳食纤维及其抗氧化活性研究[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 1–10.
- WAN RK, HE YZ, LI GJ, *et al.* Preparation and antioxidant activity of bamboo shoot soluble dietary fiber extracted by enzyme method [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(3): 1–10.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



刘 爽, 博士研究生, 主要研究方向为药用植物次生代谢和药食同源。
E-mail: 1114864585@qq.com



梁宗锁, 教授, 主要研究方向为中草药规范化栽培的理论与技术研究。
E-mail: liangzs@zstu.edu.cn