

杨梅, 管咏梅, 董欢欢, 等. 以淀粉为主成分的食药物质中抗性淀粉的理化性能、生理功能及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 486–495. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050209

YANG Mei, GUAN Yongmei, DONG Huanhuan, et al. Research Progress on Physicochemical Properties, Physiological Functions and Application of Resistant Starch in Edible Medicinal Substances with Starch as the Main Component[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 486–495. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050209

· 专题综述 ·

以淀粉为主成分的食药物质中抗性淀粉的理化性能、生理功能及应用研究进展

杨 梅, 管咏梅, 董欢欢*, 陈丽华, 朱卫丰, 段炫彤, 王胜宇, 邹家华
(江西中医药大学药学院, 江西南昌 330004)

摘 要: 抗性淀粉因具有抗消化性和益生功能性, 在维护肠道生态、调节糖脂代谢及防护心血管疾病等方面显现出较大的优势。葛根、莲子、山药等富含抗性淀粉的食药物质逐渐成为研究和开发的热点。本文综述了食药物质中抗性淀粉的理化性能及生理功能的研究进展, 并对其加工适应性及作为食品加工原料的应用场景进行了论述。食药物质中的抗性淀粉因其良好的理化加工性能广泛应用于食品领域, 能够提高食品品质, 同时对疾病防治有着积极影响, 具有调节肠道菌群、改善肠道屏障、调节炎症因子及机体糖代谢、抑制脂肪堆积等生理功能, 能够有效促进机体健康。不同来源的抗性淀粉其理化性能、生理功能及应用场景有明显差异, 其内在机制的异同以及是否包裹、携带食药物质特有的功能成分而发挥特定的生理功能都有待深入探究。本文可为以淀粉为主成分的食药物质中抗性淀粉的进一步开发提供一定的依据和思路。

关键词: 食药物质, 抗性淀粉, 理化性能, 生理功能, 应用

中图分类号: TS202.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)05-0486-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050209

本文网刊:



Research Progress on Physicochemical Properties, Physiological Functions and Application of Resistant Starch in Edible Medicinal Substances with Starch as the Main Component

YANG Mei, GUAN Yongmei, DONG Huanhuan*, CHEN Lihua, ZHU Weifeng, DUAN Xuantong,
WANG Shengyu, ZOU Jiahua

(School of Pharmacy, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China)

Abstract: Resistant starch has shown great advantages in maintaining intestinal ecology, regulating glycolipid metabolism, and protecting against cardiovascular diseases due to its anti-digestibility and probiotic function. Pueraria, lotus seeds, yam root and other edible medicinal substances that rich in resistant starch have gradually become a hot spot for researchers. In this paper, the research progress on the physicochemical properties and physiological functions of resistant starch derived from edible medicinal substances is reviewed. Its processing adaptability and application scenarios as raw food materials have also been discussed. Resistant starch derived from edible medicinal substances is widely used in food industry due to its good physical and chemical processing properties. It can improve the quality of food and has a positive impact on disease prevention and treatment, with physiological functions such as regulating intestinal flora, improving the intestinal barrier, reducing inflammatory factors, regulating the body's glucose metabolism and inhibiting fat accumulation. The physicochemical properties, physiological functions and application scenarios of resistant starch from different sources differ significantly and the underlying mechanisms need to be investigated in depth. Whether resistant starch encapsulate and carry specific functional components from edible medicinal substances to perform specific physiological functions also

收稿日期: 2022-05-19

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFC1702905); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ190675)。

作者简介: 杨梅 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 中医药食疗产品评价, E-mail: 2764534421@qq.com。

* 通信作者: 董欢欢 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 中医药食疗产品开发与评价, E-mail: donghh@jxutcm.edu.cn。

needs to be further explored. This paper may provide some basis and ideas for the further development of resistant starch in starch-based edible medicinal substances.

Key words: edible medicinal substances; resistant starch; physicochemical properties; physiological function; application

食药两用理念在我国历史上源远流长,《黄帝内经素问》有云:“用之充饥则谓之食,以其疗病则谓之药”^[1]。按照传统既是食品又是中药材的物质(以下简称:食药物质)本质是基于食药两用理念指导下,在我国传统中医学和食疗学中既可食用又可药用的中药材,因其兼具药用与食用两种功效,故常以食疗、食补、药膳等形式应用于医疗保健领域^[2]。淀粉作为日常饮食中最常见的碳水化合物,是人体最主要的能量来源,且淀粉等碳水化合物、蛋白质、脂肪以及多种微量元素在食药物质中含量较高,但之前关于食药物质功能成分的研究主要关注小分子化合物及可溶性多糖,对淀粉等非指标性成分在食药物质生物利用过程及效应发挥过程中是否产生重要影响研究较少或没有。由多个葡萄糖分子构成直链和支链结构的淀粉作为机体重要的营养物质,还可与多酚等物质形成复合物,保护生物活性,增强在胃肠道的吸收甚至实现靶向释放^[3]。多酚等物质还可与直链和支链淀粉形成新的结晶,降低复合物的消化速率并提高稳定性^[4]。

以淀粉为主成分的食药物质中直链淀粉含量占比近 20%~30%,在加工、炮制过程中易转化为抗性淀粉(Resistant starch, RS)。RS 在健康人体小肠内不容易被消化吸收,但可以被大肠内的肠道菌群部分或全部发酵产生短链脂肪酸(Short-chain fatty acids, SCFAs)等代谢物,对机体肠道菌群、糖脂代谢等产生影响。随着人们对 RS 研究的不断深入,其食药两用性得到了有效开发,不仅在食品领域应用广泛,在疾病防治中也取得了一定成效。本文主要基于目前已有研究,对以淀粉为主成分的食药物质中 RS 的理化性能、生理功能以及在疾病防治和食品工业中的应用进行综述,以为食药物质中 RS 的进一步开发提供一定的理论依据和思路。

1 食药物质中抗性淀粉的结构特征

RS 是一类在健康人体小肠内不能被消化吸收,但在大肠中可以部分或全部被肠道菌群利用产生 SCFAs、乳酸等代谢物的淀粉,按其来源及消化特性可以分为 RS1、RS2、RS3、RS4、RS5(不同类别 RS 结构见图 1)。截至目前,食药物质目录中以淀粉为主成分的物质有芡实、薏苡仁、莲子、粉葛、葛根、山药、生姜等二十余种,已报道含 RS 的包括山药、白果、莲子、葛根、薏苡仁等。不同来源淀粉均呈现不同的外貌形态,但食药物质中 RS 均呈现块状、层状等不规则形状。不同来源 RS 的不规则形态表现各不相同,但分子量范围一般都处于 3900~89000 Da 之间,绝大部分在 6300~35000 Da 之间^[5]。此外,现有研究表明食药物质中 RS 由结晶区和无定

形区两个部分构成,结晶区阻止淀粉酶活性基团的结合位点与淀粉分子结合使 RS 产生对酶水解的抗性^[6],但是目前还没有研究显示食药物质中的 RS 是否符合束模型与层模型结构。俞安珍^[7]对芡实抗性淀粉进行结构表征发现其表面粗糙,呈多孔的褶皱且无完整的颗粒结构,有多处孔状凹陷,这些孔状凹陷可能是芡实抗性淀粉得以在大肠内充分发酵产生 SCFAs 的关键;汪颖^[8]采用压热法制备的莲子抗性淀粉呈现无定形紧密结合的块状结构,经纯化处理后表现为鳞片及沟壑状的粗糙表面,结构也更加紧密。以淀粉为主成分的食药物质中除含有大量淀粉外,还有丰富的多酚、黄酮等功能成分,有研究显示淀粉的双螺旋结构与类黄酮分子通过疏水作用相互结合会降低淀粉的双螺旋结构^[9],而添加多酚可以在一定程度上抑制淀粉的回生^[10],因此多酚、黄酮等功能成分可能对 RS 结构特征存在影响,但目前缺少系统而深入的研究。

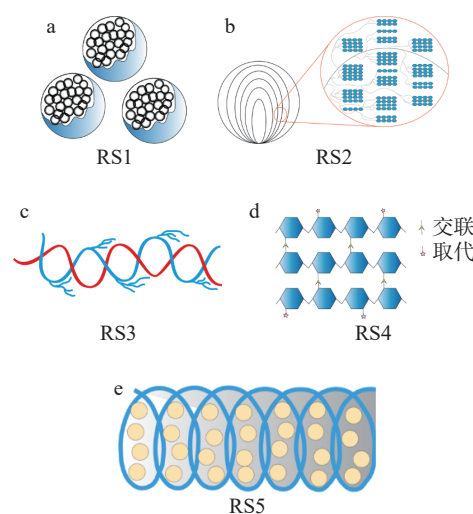


图 1 不同类别 RS 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of different types of RS

2 食药物质中抗性淀粉的理化性能

2.1 溶解度和膨胀力

淀粉的溶解度和膨胀力反映了淀粉与水相互作用的强弱,影响淀粉在食品中的应用。食药物质中 RS 的溶解度和膨胀力受温度影响较大,两者均随温度升高而增加,但小于原淀粉。张丽芳^[11]对准山药原淀粉和 RS 的溶解度和膨胀力进行测定,结果显示两者溶解度和膨胀力的变化趋势符合这一结论。此外,不同加工方式对食药物质中 RS 的溶解度和膨胀力也有影响。Zeng 等^[12]采用微波水分法、高压灭菌法和超声高压灭菌法制得莲子抗性淀粉 MP-LRS3、GP-LRS3、UP-LRS3,经测定溶解度在前期(55~75 ℃)MP-LRS3 高于其余两种,后期(85~95 ℃)UP-

LRS3 最低;膨胀力前期(55~75 ℃)无明显差别,但到后期(85~95 ℃)时 MP-LRS3 提高速度快且结束时最高,UP-LRS3 最低。因此,在制备 RS 的过程中采用微波水分法可以有效提高 RS 溶解度和膨胀力,在加工过程中对温度进行控制可以对食药物质中 RS 溶解度和膨胀力进行改变,且与原淀粉相比,RS 在同一温度下的溶解度和膨胀力都较高,在食品生产加工过程中具有更好的保水力和乳化力。

2.2 持水性和透明度

持水性是羟基与淀粉分子链共价结合后产生的结合水量大小的反映,较强的持水力能够降低食品中的水分活力,延缓水分蒸发从而延长食品的货架期^[13]。食药物质中 RS 的持水性通常较原淀粉高,且随温度升高不断增大。产生这一结果的原因可能是制备过程中淀粉短直链分子和葡萄糖单元外侧亲水性羟基增多,且糊化后淀粉分子在凝沉过程中分子重新聚集成有序结晶,使 RS 具有类似海绵多孔状结构^[14],增大了 RS 的持水力。马丽苹等^[15]对怀山药原淀粉和压热法制备的 RS 持水性的研究结果显示两者持水性均随温度升高而不断增大,且 RS 持水性大于原淀粉,与张丽芳^[11]的研究结果一致。

透明度是影响食药物质中 RS 用途、外观和可接受性的重要指标之一,常用透光率进行评价,透光率越高 RS 透明度越高,加工所得产品的可接受度也越高^[16]。研究表明 RS 透光率与直链淀粉含量直接相关,食药物质中 RS 的直链淀粉含量高于原淀粉,相互缔合使光线散射,降低了透光率,使透明度下降^[11]。因此在加工过程中可以通过控制 RS 含量或控制 RS 中直链淀粉含量达到控制淀粉产品透明度的目的。

2.3 黏度和冻融稳定性

食药物质中的 RS 黏度较原淀粉相比有所下降,在烹饪处理中也不会发生改变。Li 等^[17]对生姜原淀粉和 RS 黏度的测定结果证明了这一结论。此外,食药物质中 RS 黏度会随含量的增加而下降,因此加工过程中可在保证产品口感和品质的前提下控制 RS 含量对产品黏度进行调控。

冻融稳定性是糊化或未糊化淀粉在低温环境下进行冷冻后再放置于室温或更高温度下使淀粉融化过程中的稳定性,常用析水率大小来评价,析水率越大冻融稳定性越差。淀粉作为速冻面食的主要原料,冻融稳定性差会直接影响产品品质,对产品运输和贮藏中物流水平和冷链技术要求高,不利于产品商业化^[18]。张伟等^[19]对银杏中的原淀粉和 RS 冻融稳定性的测定结果表明 RS 析水率高于原淀粉,且随冻融次数增加析水率不断增大,增幅不断减小并趋于平稳,与李涛等^[20]对紫山药原淀粉和 RS 冻融稳定性的测定结果一致。因此,由食药物质中 RS 制得的速冻产品为确保其在运输、储存等过程中不因冻融稳定性差而影响品质、增加成本,可在加工过程中加入适量亲水性胶体提高稳定性。

2.4 热力学特性

RS 平均聚合度 DPn 在 30~200 之间,含热量低,热值一般不超过 10~10.5 kJ/g,在受热过程中热力学性质会发生改变。受热过程中的焓变是结晶形成质量和程度的反映;糊化起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、最终糊化温度(T_c)升高表示淀粉颗粒双螺旋结构和结晶增多;糊化范围($T_c \sim T_0$)表示淀粉颗粒内微晶的差异^[21]。有研究表明白果^[22]和芡实^[23]中 RS 的 T_0 、 T_p 、 T_c 显著高于原淀粉,糊化温度范围($T_c \sim T_0$)显著增大,说明 RS 较原淀粉分子变小,直链淀粉比例增加,分子重新排列形成了更加牢固的晶体结构,结晶体的差异程度也有所增大,这与马丽苹等^[15]对准山药热特性的研究结论一致。因此,食药物质中 RS 具有较好的热稳定性,有利于食品加工生产。也有研究证明经脱支酶处理会增加直链淀粉含量,使之在老化过程中重组形成结构紧密结晶体,从而提高 RS 热稳定性^[24],但尚未见关于这一方法可以提高食药物质中 RS 热稳定性的报道。

3 食药物质中抗性淀粉的生理功能

3.1 对肠道菌群的调节作用

RS 作为发酵底物在大肠内被部分或完全发酵后可以调节肠道菌群,促进肠道内拟杆菌、长双歧杆菌、梭状芽孢杆菌以及乳酸杆菌等有益菌的增殖^[25]。对肠道有益菌增殖的影响与 RS 的表观粗糙程度有关,RS 在肠道内发酵后的粗糙结构可以保护有益菌免受肠道 pH 下降带来的影响;Zeng 等^[26]研究发现摄入中、高剂量的莲子抗性淀粉后乳酸杆菌、双歧杆菌、瘤胃球菌等有益菌的增殖显著提高,同时,研究中还发现 20% 乙醇沉降的莲子抗性淀粉颗粒因其表面较 30% 乙醇沉降的莲子抗性淀粉粗糙而更容易被肠道菌群快速利用;Li 等^[27]以紫山药为原料制备出 RS 后发现具有粗糙表面和完美晶体的紫山药抗性淀粉可以保护双歧杆菌免受胃肠道条件的影响,促进双歧杆菌增殖。食药物质中的 RS 增强肠道菌群的代谢能力;Lei 等^[28]研究发现莲子抗性淀粉促进双歧杆菌和大肠杆菌的增殖,使肠道分泌更多胆盐水解酶(BSH)和羟类固醇脱氢酶(HSDH),加速牛磺胆酸钠(STCA)的水解,减少牛磺脱氧胆酸钠(STDCA)的转换。食药物质中的 RS 影响肠道菌群的构成;Upadhyaya 等^[29]研究证明,膳食中补充抗性淀粉可有效增加肠道内产丁酸菌的比例,增加青春双歧杆菌和异拟杆菌的丰度,但不增加布氏瘤胃球菌、普氏粪杆菌,调节肠道菌群的构成。因此,食药物质中的 RS 在肠道中发酵后可以促进肠道内有益菌的增殖并改变肠道菌群的代谢以及构成。不同来源 RS 增殖的益生菌属见表 1。

3.2 对肠道屏障的调节作用

肠道屏障由机械屏障、化学屏障、菌群屏障和免疫屏障构成。食药物质中的 RS 改善宿主肠道屏障功能的途径包括:a. 促进肠道蠕动改善机械屏障;b.

表 1 不同食药物物质中 RS 的作用与通路
Table 1 Effects and pathways of RS in different edible medicinal substances

RS来源	肠道菌群	通路	作用	参考文献
莲子	乳酸菌↑、双歧杆菌↑、志贺氏菌↓、 大肠杆菌↓、SCFAs↑	FoxO、MAPK、PI3K-AKT、 P53、BUT	降低血糖和血脂,调控肠道菌群,促进肠 道内胆酸转化为胆汁酸	[28, 42]
葛根	拟杆菌↑、厚壁菌↑、双歧杆菌↑、 疣微菌↓、SCFAs↑	IRA-1、PI3K、AKT、Glut4	降低血糖和血脂,降低内毒素和D-甘露 醇,增强脂质代谢,促进肠道健康	[33]
山药	拟杆菌↑、双歧杆菌↑、乳酸杆菌↑	—	控制体重,改善肠道病变,调节血脂	[27]
薏苡仁	双歧杆菌↑、乳酸杆菌↑、大肠杆菌↓、 SCFAs↑	—	降低肠道pH,促进肠道健康,抑制脂肪堆 积,增强免疫力	[47]

促进宿主对黏蛋白的表达改善化学屏障;c. 调节肠道菌群组成改善菌群屏障^[30]。RS 在大肠内发酵产生 SCFAs 等次级代谢产物,降低肠道 pH 和氧化还原电位,阻止不耐酸的有害菌群生长繁殖,促进乳酸菌和双歧杆菌生长,乳酸菌通过上调 T_j 蛋白减少肠道屏障损伤,双歧杆菌则通过维持 T_j 蛋白构象,补充营养以保护肠道屏障^[31]。Qin 等^[32]对肉鸭肠屏障功能的研究结果显示,添加 12% 莲子抗性淀粉的肉鸭中醋酸盐、丙酸盐和丁酸盐含量显著增加,丁酸盐刺激黏液屏障的主要成分黏蛋白-2(MUC-2)合成,覆盖肠黏膜以维持有效黏液层,改善了肉鸭的盲肠屏障功能。本课题组前期对葛根中 RS 的研究结果表明,T2DM 小鼠经葛根抗性淀粉处理后进入血液的内毒素和 D-甘露醇减少,紧密连接蛋白-1(ZO-1)、MUC-2 等肠道屏障相关基因表达增加,肠黏膜保护蛋白水平相关的表达正常化^[33]。因此,食药物物质中的 RS 通过对机械、化学、菌群屏障的调节改善肠道屏障,但是目前对该类物质通过调节免疫屏障改善肠道屏障的研究还未见报道。免疫屏障主要由免疫细胞、免疫因子以及部分炎症因子发挥作用,免疫屏障损伤会引起肠道内致病菌的过度繁殖甚至引发细菌或内毒素移位,导致肝脏产生炎症反应^[34],通过促进免疫细胞和免疫因子分泌,下调炎症因子表达,可以有效改善免疫屏障。已有研究证明 RS 可以诱导肠道分泌免疫球蛋白 IgA 增强肠道屏障^[35]。因此,在后续研究中应探究食药物物质中 RS 是否也能通过诱导肠道分泌免疫因子增强免疫屏障。

3.3 对机体炎症因子的调节

RS 可以调节 TNF-α、IL-1β、IL-10、IL-6、NF-κB、MCP-1 等炎症因子的表达。促炎细胞因子 IL-1β 含量和活性增加快且持续整个炎症过程,TNF-α 则偏重组织损伤炎症^[36],有研究表明 TNF-α、IL-6 的表达受核因子 NF-κB 调节,RS 在大肠内被利用产生丁酸盐会抑制 NF-κB 活化,降低 TNF-α、IL-6 的表达,且这一调节作用与 RS 摄入量正相关^[37]。曹承嘉^[38]的研究结果显示,给酒精性胃损伤小鼠灌高剂量青稞抗性淀粉后 TNF-α 和 IL-6 含量显著下降,胃部炎症得到缓解,且随 RS 含量增加改善作用增强;Valcheva 等^[39]对 IL-10 缺乏小鼠的研究也得到了相似的结论,喂食 RS 的小鼠结肠分泌的 IL-6、CXCL-1 表达比对照组少 55%~77%,结肠炎症得到明显改善。关

于食药物物质中 RS 调节炎症因子的研究目前较少,本课题组前期研究结果显示,葛根抗性淀粉可有效改善 T2DM 小鼠血清炎症因子水平,用不同剂量葛根抗性淀粉治疗 4 周后 T2DM 小鼠 MCP-1、TNF-α 水平显著降低且显示出一定的定量效应关系^[33]。不同来源 RS 干预后炎症因子变化见表 2。

3.4 对糖代谢的调节机制

RS 具有消化率低的特点,有助于降低餐后血糖水平以及控制葡萄糖的释放,降低食物总能量值的同时延缓血糖飙升,同时还有调节糖代谢的功能^[40]。RS 调节体内糖代谢的一个重要机制是通过维持肠道内具有葡萄糖浓度依赖性降糖作用的胰高血糖素样肽-1(GLP-1)和多肽 YY(PYY)的分泌达到降糖作用,调节胰岛素敏感的一个可能机制是改变脂肪酸流量,机体内脂肪酸的代谢是决定机体组织胰岛素敏感的关键特征,在这些胰岛素敏感组织中,脂肪酸的储存以及脂解异常等往往会影响胰岛素抵抗^[41]。目前有关 RS 调节糖代谢的研究已经有很多,也有研究表明莲子中的 RS 可以有效提高糖尿病小鼠的糖耐量,增强外周组织的胰岛素敏感性,中剂量(10%)的莲子抗性淀粉可以最有效地调节糖代谢达到降血糖的功效^[42]。本课题组前期研究也表明摄入不同剂量的葛根抗性淀粉有助于恢复 IRS-1、p-PI3K、p-Akt 和 Glut4 的表达,从而提高胰岛素合成效率,显著降低 T2DM 小鼠的空腹血糖值^[33]。因此认为食药物物质中的 RS 能够影响糖代谢的调节机制,但目前关于食药物物质中 RS 调节糖代谢的研究只在莲子和葛根中有展开,且对具体调节机制尚有研究空间,对其他食药物物质中 RS 调节糖代谢的研究也有待开展。

3.5 抑制脂肪堆积

RS 代谢产物 SCFAs 作为肠道内不可或缺的调节因子,在肝脏组织中有显著表达,可下调与脂肪形成有关的基因表达,增强与脂质有关的转运蛋白表达,从而起到改善非酒精性脂肪肝并控制肥胖的作用^[43]。李颖等^[44]研究显示 SCFAs 与游离脂肪酸受体 2(FFAR2)结合后,刺激肝脏和脂肪组织中的腺苷酸活化蛋白激酶(AMPK)活性,进而促进并激活下游关键转录因子过氧化物酶体增殖物激活受体(PPAR)α 等的表达,改善脂质代谢紊乱。另一方面,RS 在肠道中可与胆汁酸(Bile acids, BAs)结合,随 RS 含量及颗粒粗糙程度的增加,对 BAs 的结合能力增强,从

表2 不同来源RS对炎症因子的调节作用

Table 2 Regulatory effects of RS from different sources on inflammatory factors

RS来源	动物模型	给药方式	剂量	实验周期	炎症因子变化	参考文献
稻米	ICR小鼠, 雄性	灌胃	5.0 g/kg·bw ⁻¹	4周	CRP↓; TNF-α↓; IL-6↓; NF-Kb↓	[36]
青稞	酒精性胃损伤小鼠, 雌雄各半	灌胃	1.6 g/kg·bw ⁻¹ ; 3.2 g/kg·bw ⁻¹	1周	TNF-α↓; IL-6↓	[38]
葛根	T2DM小鼠, 雄性	灌胃	5.0 g/kg·bw ⁻¹ ; 2.5 g/kg·bw ⁻¹ ; 0.5 g/kg·bw ⁻¹	4周	MCP-1↓; TNF-α↓	[33]
玉米	IL-10缺陷小鼠, 雄性	饮食添加	2%RS+2%纤维素	12周	IL-6↓; CXCL-1↓	[39]

而包裹 BAs 将其排出体外, 而 RS 的颗粒结构可保护有益菌免受高浓度 BAs 的破坏, 促进利用 BAs 的有益菌增殖, 影响次级 BAs 代谢, 达到抑制脂肪堆积的效果^[45]。有研究表明莲子中的 RS 会影响脂肪堆积, 达到控制体重的效果, 例如林珊^[46]将雌雄各半的 70 只小鼠分别给予高(15%)、中(10%)、低(5%)剂量的莲子抗性淀粉 15 d, 从 12 d 开始中剂量和高剂量组小鼠的体重增加显著低于对照组和低剂量组, 研究表明莲子抗性淀粉具有促进双歧杆菌产丁酸、乙酸等 SCFAs 的能力, 提高了双歧杆菌的耐胆酸盐能力, 有效控制了小鼠体重增长。

由表 1 可知, 不同食药物质中的 RS 对肠道内菌群的影响不尽相同, 但都促进了双歧杆菌的增殖, 对肠道健康都发挥作用, 但目前对其作用通路的研究只有莲子和葛根两种, 研究显示葛根和莲子抗性淀粉均具有良好的调节血糖和血脂的作用。食药物质中的 RS 会影响机体健康(图 2), 因此山药、薏苡仁等还没有报道 RS 在机体内作用通路及降血糖血脂作用研究的食药物质还有待深入开发。

3.6 其他

除上述功能外, RS 还具有以下作用:

促进矿物质吸收。有研究表明抗性淀粉可以提

高机体对钙离子、镁离子、铁离子等矿物质的吸收, 其在大肠内发酵产生的 SCFAs 是促进矿物质吸收的主要因素之一。Zeng 等^[48]给小鼠喂食适当剂量的 RS3 型莲子抗性淀粉后, 丁酸、乳酸和琥珀酸等肠道内的有机酸与 SCFAs 一起通过降低肠道 pH、增加矿物质溶解度和促进肠壁细胞生长来促进钙、镁和铁等矿物质吸收。

益生元。益生元作为一种膳食补充剂可以选择性地刺激机体内有益菌的生长繁殖, 改善寄主健康, RS 作为益生元在结肠内发酵产生对宿主有益的产物, 促进双歧杆菌等有益菌的生长繁殖。林珊^[46]的研究结果显示莲子中的抗性淀粉对双歧杆菌、乳酸菌有显著益生作用, 可以有效促进双歧杆菌和乳酸菌产生大量乙酸、丁酸、乳酸, 改善肠道环境, 增强菌群在低 pH、高胆酸盐环境中的耐受性。

降低胆固醇, 减少胆结石发病率。目前胆结石主要以胆固醇结石为主, 与脂类代谢、胆固醇过饱和等因素密切相关, RS 能够有效降低脂蛋白和血浆胆固醇, 提高排泄物胆固醇含量, 降低胆固醇结石的形成从而减少发病^[49]。目前 RS 减少胆结石发病率的研究已经较多, 但是关于食药物质中的 RS 在这方面的研究还未见报道, 因此后续除继续深入探究已有报

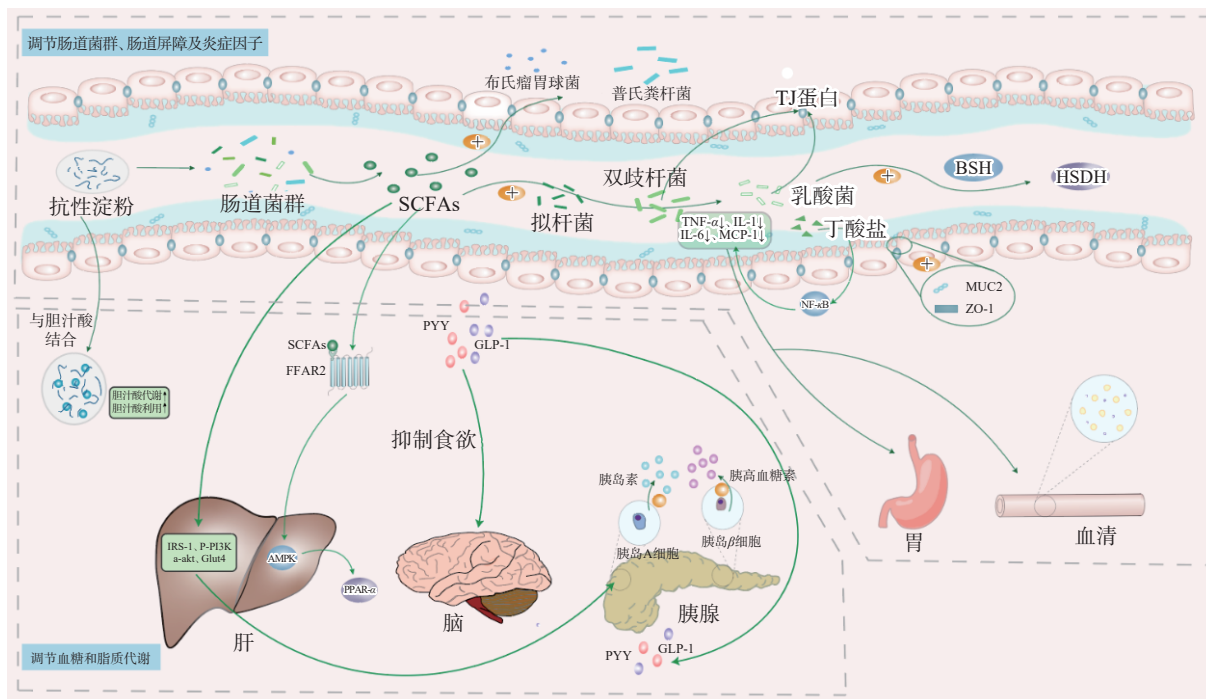


图2 食药物质中的RS对健康的影响

Fig.2 Effects of RS in edible medicinal substances on health

道的生理功能外,也要对食药物物质中抗性淀粉减少胆结石发病率进行评估。

4 食药物物质中抗性淀粉的应用研究

4.1 在疾病防治中的应用

目前对食药物物质中 RS 在临床应用的研究较少,但作为近年来膳食纤维研究的热点,已有临床试验表明 RS 在临床疾病治疗方面发挥作用。

4.1.1 降低肠道疾病的发病率 RS 在大肠中作为益生菌的培养基不断发酵,发酵产物主要为气体和 SCFAs,促进肠道蠕动并使肠道内低级脂肪酸盐含量上升,肠道 pH 下降,且肠道内益生菌的大量繁殖抑制了有害菌群的增殖,有利于预防便秘、盲肠炎、痔疮、结直肠癌等肠道疾病。Humphreys 等^[50]对 23 名志愿者进行了四次为期 4 周的随机交叉饮食干预实验。研究表明 RS 可以提高结肠丁酸盐水平,改变肠道微生物群落丰度,减少对致癌物的腺瘤形成。Hald 等^[51]对 19 名代谢综合征受试者分别给予低纤维西式饮食(主要含精制谷物和最低浓度膳食纤维)和健康碳水化合物饮食(富含阿拉伯木聚糖和 RS)进行为期 4 周的干预和 4 周的中间洗脱后,分析比较干预前后的粪便样本,结果表明干预结束后健康碳水化合物饮食组粪便中总 SCFAs、醋酸盐和丁酸盐浓度较高,双歧杆菌丰富度也显著提升,提示 RS 摄入改变了肠道内微生物、SCFAs 含量和组成,对肠道疾病具有潜在有益作用。

4.1.2 治疗糖尿病 II 型糖尿病(T2DM)是一种以慢性高血糖为主要特征的代谢性疾病,胰岛素抵抗是 T2DM 的共同特征,而肥胖会加速其发展,因此体重控制将有助于改善胰岛素抵抗和提高 T2DM 患者的降糖药物疗效^[52]。代谢性疾病的营养干预措施之一是膳食补充 RS,食用高 RS 膳食可以提高对胰岛素的敏感性和增加饱腹感,对 T2DM 患者能够起到延缓餐后血糖上升、控制糖尿病病情的效果。Hughes 等^[53]将 30 名年龄在 40~65 岁的健康受试者随机分配接受富含 RS2 的小麦和野生型小麦进行饮食干预,与对照组相比,摄入 RS 的受试者葡萄糖平均值和胰岛素平均值均显著降低,峰值葡萄糖和胰岛素也显著下降;Meng 等^[54]将 75 名早期糖尿病肾病患者随机分为干预组(每天午餐和晚餐接受 50 g 高 RS、低蛋白质面粉)、对照组(普通主食)进行 12 周的临床试验观察,结果显示与对照组相比,高 RS、低蛋白质面粉摄入导致空腹血糖、HbA1c、总胆固醇和甘油三酯水平显著降低,有效改善早期糖尿病肾病患者的血糖和血脂水平。

4.1.3 改善非酒精性脂肪肝 非酒精性脂肪性肝病(NAFLD)的发生通常伴随着肠道菌群的稳态失衡,肠道内肠杆菌等有害菌群会破坏肠粘膜,使外周组织及门静脉内毒素含量增加,损伤肝细胞,而双歧杆菌、拟杆菌等可以抑制胆汁淤积,改善肠肝循环。RS 作为一种能够在大肠内被肠道菌群部分或完全发

酵的膳食纤维影响肠道菌群稳态,对改善非酒精性脂肪肝有一定作用。钱玲玲^[55]在动物研究中证明通过恢复正常的肠道菌群可以逆转 NAFLD 大鼠的胰岛素抵抗、内皮系统紊乱等代谢紊乱,采用玉米抗性淀粉干预可显著降低受试者的体重、BMI、腹部脂肪等指标,改善肝酶、血脂谱和糖代谢。莲子抗性淀粉在肠道内发酵后结构更加稳定,有利于促进肠道菌群稳态,增加肠道内双歧杆菌、乳酸杆菌等促进乙酸和乳酸产生的菌群,有效改善肠肝功能^[26]。但是目前关于 RS 改善非酒精性脂肪肝的研究多停留在动物实验阶段,临床试验研究结果尚未见报道。

4.1.4 治疗肥胖 目前中国成人血脂异常患病率高达 40.40%,其发病原因与日常生活中的高脂、高热量、高糖饮食、缺乏运动等不良生活方式导致的肥胖密切相关^[56]。肥胖并发高脂血症是由于肥胖引起的一种脂代谢异常综合征,患者体内血浆中胆固醇(TC)和甘油三酯(TG)代谢异常,极易引起肝脏和心脑血管病变,严重威胁人类的生命健康^[57]。RS 与体内胆汁酸结合可以提高机体代谢速率,在肠道内发酵产生 SCFAs 有效调节机体脂质代谢,控制肥胖。Zhang 等^[58]每天给 19 名正常体重受试者服用 40 g RS2 或能量匹配的对照淀粉,并提供三种相同的饮食。实验结果显示 RS2 摄入后,内脏和皮下脂肪面积显著减少,醋酸盐和早期胰岛素、C 肽和 GLP-1 分泌增加,低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)和血尿素氮(BUN)水平降低,表明 RS2 对控制体脂及肥胖相关指标具有积极意义,有助于控制体重增长,降低肥胖发生概率。

4.1.5 预防心血管疾病 根据世界卫生组织的数据,全球 50% 的死亡(其中发展中国家占比高达 40.1%)是由慢性非传染性疾病造成的,在这些慢性非传染性疾病中,心血管疾病仍然是发达国家死亡和残疾的主要原因^[59]。高血脂和高胆固醇会使血管腔壁血脂沉淀,导致血管变窄堵塞,是高血压、动脉粥样硬化、冠心病等心血管疾病发病的重要因素。此外,超重和肥胖也是诱发心血管疾病的重要原因。有研究表明,RS 能够降低机体内血脂以及胆固醇含量,抑制脂肪堆积,降低体重,对预防心血管疾病有一定作用。Nichenametla 等^[60]对受试者给予富含 RS4 的面粉和普通面粉进行双盲、安慰剂对照、群集交叉干预($n=86$, 年龄 ≥ 18 , 2~12 周干预,2 周清除),结果显示,与正常组相比,RS4 摄入导致受试者平均总胆固醇降低 7.2%,非高密度脂蛋白降低 5.5%,高密度脂蛋白胆固醇降低 12.8%,体脂百分比降低了 1.5%,这些影响心血管疾病指标的变化表明 RS4 的摄入可以降低患心血管疾病风险,有助于预防并改善心血管疾病。

综上所述,抗性淀粉可在临床肠道疾病、糖尿病、非酒精性脂肪肝、肥胖、心血管疾病治疗方面发挥疗效,动物实验表明食药物物质中的 RS 在这些疾病

治疗中也能发挥作用,但目前尚缺乏临床数据支撑,因此在今后的研究中可以进一步探索该类物质应用于临床是否能够发挥较好的治疗效果及具体作用机制如何进行,为该类物质更好地应用于临床提供理论依据。

4.1.6 作为功能因子、药物载体 功能因子是功能食品真正起生理作用的活性成分,是生产功能食品的关键,基于 RS 优越的生理功效,其与大豆异黄酮、多糖等功能因子联合应用会产生协同效应。孟妍^[61]对黄精多糖联合 RS 应用于早期糖尿病的研究结果显示高 RS 黄精多糖饼干可以显著降低患者 IL-6、糖化血红蛋白水平,提高血清 T-SOD,调节血糖并增强机体抗氧化水平,降低炎症反应达到保护肾脏的作用;Yuko 等^[62]的研究结果显示大豆异黄酮和 RS 联合治疗增加了雌马酚的产生并改善了肠道,提高了雌激素水平,可以有效防止小鼠卵巢切除诱导的骨密度和骨强度下降。还有研究显示以 RS 和功能因子亚油酸为原料合成的亚油酸 RS3 酯制备的缓释包衣片可以靶向运输至结肠并实现持续释药^[63]。Chen 等^[64]的研究结果也证明 RS 可以作为结肠靶向药物基质递送系统的潜在递送载体。因此,RS 可以与功能因子联合作用增强食品的保健功能,也可以作为药物载体应用于结肠靶向给药,但目前关于食药物质中 RS 在这方面的研究尚未见报道,以淀粉为主成分的食药物质中含有丰富的 RS 和各类功能因子,若能够阐明 RS 联合不同功能因子对机体的作用机制,对后续更充分地开发利用食药物质并提高食品的保健功效具有重要意义。

4.2 在食品中的应用

4.2.1 在蒸煮食品中的应用 RS 在烹饪过程中糊化和粘度不会发生改变,且能够在高温处理后保持原有的营养成分,因此,将 RS 加入到日常饮食的蒸煮食品中能够增加其耐煮性,有利于维持韧性结构,避免煮后出现黏连现象的同时最大程度保留营养成分。例如,肖永霞等^[65]研究发现在面条中添加 8% 小麦抗性淀粉时面条的粘聚性、弹性、热稳定性等达到最佳状态,所制作的面条品质达到最佳。近年来也有人将甘草、山药等富含 RS 的食药物质加入到粽子中,制作出富含 RS 的粽子不仅整体性好而且可以调节肠胃机能,改善肠道菌群,促进肠道健康^[66]。因此将食药物质中的 RS 加入到蒸煮食品中在改善食品品质的同时提高了营养成分含量。

4.2.2 在焙烤食品中的应用 RS 具有良好的结构改良作用,近年来被广泛应用于面包、饼干等焙烤类食品中,与添加传统膳食纤维不同的是,添加 RS 的焙烤食品不会出现口感粗糙的情况,较好地改善食品质地。研究发现 RS2 比其他膳食纤维具有更低的持水能力,对面团的流变学影响程度小,可明显改善面包的品质^[67],但在面包中加入过多的 RS 会使粘度、咀嚼性降低,给面包品质带来一定影响。有研究表明食

品中 RS 含量少于 2% 则不再具备生理功效^[68],因此,怎样将 RS 在不影响品质的条件下加入到食品中发挥最大的生理功效是一个关键问题。汤勇铮^[69]将不同比例葛根抗性淀粉与辅料混合后分别在 35 和 30 °C 下依次醒发 30 min 后 150 °C 烘焙约 15 min。结果表明,添加比例为 30% 时产品口感和品质最佳且达到具备生理功效的量,能够一定程度上调节餐后血糖。此外,因为饼干对面团的要求较低,在饼干中添加较大比例的 RS 可以使饼干质地松软、色泽明亮并满足发挥生理功效的目的,如果将来源于葛根、白果、莲子、山药等食药物质中的 RS 加入到饼干中,可以在一定程度改善饼干口感的同时具有保健功能。

4.2.3 在功能性食品中的应用 RS 在肠道内被发酵后产生丁酸盐等短链脂肪酸盐,降低肠道 pH,调节肠道菌群,改善肠道环境,促进肠道蠕动,对便秘、炎症等有良好的预防作用^[70]。此外,RS 还能够调节糖脂代谢,对肥胖和糖尿病防治具有积极意义^[71]。上述良好的生理功能使 RS 成为一种具有广阔应用前景的高品质功能性保健食品研发原料。郑亚凤等^[72]研发了一种富含莲子抗性淀粉的咀嚼片,不仅保持了莲子的营养成分,还将莲子抗性淀粉的含量增加至 25%~32%,具有低热量和低血糖生成指数的特点,满足人体对营养和膳食纤维需求的同时调节血糖,缓解高血糖症状,是一种良好的功能保健食品。目前,应用于功能性食品中来源于食药物质的 RS 主要是莲子抗性淀粉、葛根抗性淀粉以及山药抗性淀粉,对于生姜、芡实、白果、红小豆等食药物质抗性淀粉的开发还有待于进一步深入。

5 总结与展望

食药物质中的 RS 因其良好的理化加工性能广泛应用于蒸煮、焙烤以及功能性食品开发等食品领域,能够较好地提高食品品质,同时具有调节肠道菌群、改善肠道屏障、调节炎症因子及机体糖代谢、抑制脂肪堆积等生理功能,对疾病防治有着积极影响,能够有效促进机体健康。但是目前对该类物质的研究大多停留在动物实验阶段,缺少临床数据支撑,对机体具体作用机制也未得到充分明确,因此今后应致力于含淀粉食药物质中 RS 的开发利用。此外,食药两用膳食纤维具有肠道健康功效的同时保留了部分药用成分,存在未知功能活性成分,但关于食药物质中 RS 是否包裹、携带功能活性成分尚未有文献报道,在今后的研究中应对这个方面进行探索,从而更加系统全面地评价其理化性质和生理功能。

参考文献

- [1] 张华峰. 药食同源相关术语问题与对策[J]. 中国科技术语, 2019, 21(4): 65-71. [ZHANG Huafeng. Problems and counter-measures of terms related to homology of medicine and food[J]. Chinese Journal of Science and Technology, 2019, 21(4): 65-71.]
- [2] 唐雪阳, 谢果珍, 周融融, 等. 药食同源的发展与应用概况[J]. 中国现代中药, 2020, 22(9): 1428-1433. [TANG Xueyang,

- XIE Guozhen, ZHOU Rongrong, et al. Overview of the development and application of homology of medicine and food[J]. *China Modern Chinese Medicine*, 2020, 22(9): 1428–1433.]
- [3] 干福良, 卞希良, 夏凤清, 等. 短直链淀粉-多酚复合纳米颗粒的制备及性质研究[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(11): 77–82. [GAN Fuliang, BIAN Xiliang, XIA Fengqin, et al. Preparation and properties of short amylose-polyphenol composite nanoparticles[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(11): 77–82.]
- [4] 赵蓓蓓, 贾祥泽, 孙思薇, 等. 淀粉-多酚复合物理化及功能特性的研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(13): 297–303. [ZHAO Beibei, JIA Xiangze, SUN Siwei, et al. Research progress on physicochemical and functional properties of starch-polyphenol complexes[J]. *Food Science*, 2018, 39(13): 297–303.]
- [5] 杨光, 丁霄霖. 抗性淀粉分子量分布的研究[J]. *中国粮油学报*, 2000(5): 37–40. [YANG Guang, DING Xiaolin. Study on molecular weight distribution of resistant starch[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2000(5): 37–40.]
- [6] 邹应龙, 王瑶. 抗性淀粉的结构及生理功能研究[J]. *中国粮油学报*, 2008(3): 63–72. [WU Yinglong, WANG Yao. Study on the structure and physiological function of resistant starch[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2008(3): 63–72.]
- [7] 俞安珍. RS3 型芡实抗性淀粉的制备及其体外消化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018. [YU Anzhen. Preparation of RS3 type resistant starch from *Euryale ferox* and its digestibility *in vitro*[D]. Hangzhou: Zhejiang Technology and Business University, 2018.]
- [8] 汪颖. 莲子抗性淀粉制备、性质及其对双歧杆菌增殖效应的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013. [WANG Ying. Study on the preparation and properties of lotus seed resistant starch and its effect on the proliferation of *Bifidobacterium*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.]
- [9] ZHOU Xiaoli, WANG Shichou, ZHOU Yiming. Study on the structure and digestibility of high amylose Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) starch-flavonoid prepared by different methods[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(4): 1463–1474.]
- [10] XIAO Huaxi, LIN Qinlu, LIU Gaoqiang, et al. Inhibitory effects of green tea polyphenols on the retrogradation of starches from different botanical sources[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(8): 2177–2181.]
- [11] 张丽芳. 淮山药淀粉及抗性淀粉理化性质的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013. [ZHANG Lifang. Study on the physicochemical properties of Chinese yam starch and resistant starch[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.]
- [12] ZENG Shaoxiao, WU Xiaoting, LIN Shan, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of lotus seed resistant starch prepared by different methods[J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 213–222.]
- [13] 余海洋. 银杏抗性淀粉的制备、性质及其应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013. [YU Haiyang. Preparation, properties and application of resistant starch from *Ginkgo biloba*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.]
- [14] SUJITTA R, ANIL K A. Effects of linterization, autoclaving, and freeze-thaw treatments on resistant starch formation and functional properties of pathumthani 80 rice starch[J]. *Foods*, 2019, 8(11): 558.]
- [15] 马丽苹, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 怀山药抗性淀粉理化性质及体外消化性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(11): 41–46. [MA Liping, JIAO Kunpeng, LUO Lei, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of resistant starch from Chinese yam[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(11): 41–46.]
- [16] 杜双奎, 王华, 聂丽洁. 芸豆淀粉理化特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(8): 31–35. [DU Shuankui, WANG Hua, NIE Lijie. Study on physicochemical properties of kidney bean starch[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2012, 27(8): 31–35.]
- [17] LI Xin, CHEN Wei, CHANG Qing, et al. Structural and physicochemical properties of ginger (*Rhizoma curcumae longae*) starch and resistant starch: A comparative study[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 144(3): 67–75.]
- [18] 王梦嘉, 叶晓汀, 吴金鸿, 等. 淀粉冻融稳定性的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2016, 24(5): 19–23. [WANG Mengjia, YE Xiaoding, WU Jinhong, et al. Research progress on freeze-thaw stability of starch[J]. *Cereals, Oils and Food Science and Technology*, 2016, 24(5): 19–23.]
- [19] 张伟, 张焕新, 张海涛, 等. 银杏抗性淀粉的微波-酶法制备及性质研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(10): 5–10. [ZHANG Wei, ZHANG Huanxin, ZHANG Haitao, et al. Microwave-enzymatic preparation and properties of *Ginkgo biloba* resistant starch[J]. *Food Industry*, 2018, 39(10): 5–10.]
- [20] 李涛, 童金华, 宋洪波, 等. 紫山药淀粉与其抗性淀粉理化性质的比较[J]. *包装与食品机械*, 2017, 35(4): 13–18. [LI Tao, TONG Jinhua, SONG Hongbo, et al. Comparison of physicochemical properties of purple yam starch and resistant starch[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2017, 35(4): 13–18.]
- [21] JAYAKODY L, HOOVER R, LIU Q, et al. Studies on tuber and root starches. I. Structure and physicochemical properties of inula (*Solenostemon rotundifolius*) starches grown in Sri Lanka[J]. *Food Research International*, 2005, 38(6): 615–629.]
- [22] 张伟, 袁华平, 张焕新. 银杏抗性淀粉的超声波-酸解法制备及热力学性质分析[J]. *食品科技*, 2018, 43(11): 293–299. [ZHANG Wei, YUAN Huapin, ZHANG Huanxin. Ultrasonic-acid hydrolysis preparation and thermodynamic properties analysis of resistant starch from *Ginkgo biloba*[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(11): 293–299.]
- [23] 杨珏熹, 曹一丹, 俞安珍, 等. RS3 型芡实抗性淀粉的制备及纯化工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 69–76. [YANG Yuexi, CAO Yidan, YU Anzhen, et al. Study on the preparation and purification process of RS3 type Gorgonii resistant starch[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2020, 35(10): 69–76.]
- [24] 申瑞玲, 刘晓芸, 董吉林, 等. 抗性淀粉制备及性质和结构研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(1): 5–8. [SHEN Ruiling, LIU Xiaoyun, DONG Jilin, et al. Research progress on the preparation, properties and structure of resistant starch[J]. *Food and Oil*, 2013, 26(1): 5–8.]
- [25] CAO Yu, LIU Hongli, QIN Ningbo, et al. Impact of food additives on the composition and function of gut microbiota: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 295–310.]

- [26] ZENG Hongliang, ZHENG Yixin, LIN Yan, et al. Effect of fractionated lotus seed resistant starch on proliferation of *Bifidobacterium longum* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and its structural changes following fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2018, 268: 134–142.
- [27] LI Tao, CHEN Lei, XIAO Jianbo, et al. Prebiotic effects of resistant starch from purple yam (*Dioscorea alata* L.) on the tolerance and proliferation ability of *Bifidobacterium adolescentis* *in vitro*[J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 2416–2425.
- [28] LEI Suzhen, LIU Lu, DING Linyu, et al. Lotus seed resistant starch affects the conversion of sodium taurocholate by regulating the intestinal microbiota[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 186: 227–236.
- [29] UPADHYAYA B, MCCORMACK L, FARDIN A R, et al. Impact of dietary resistant starch type 4 on human gut microbiota and immunometabolic functions.[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28797.
- [30] 王超越, 韩璿, 吴正钧, 等. 益生菌对宿主肠道屏障功能的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–9 [2022-07-07]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030031. [WANG Chaoyue, HAN Yu, WU Zhengjun, et al. The effect of probiotics on the host intestinal barrier function [J/OL]. *Food and Fermentation Industry*: 1–9 [2022-07-07]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030031.]
- [31] ROSE E C, ODLE J, BLIKSLAGER A T, et al. Probiotics, prebiotics and epithelial tight junctions: A promising approach to modulate intestinal barrier function[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(13): 6729–6729.
- [32] QIN Simeng, ZHANG Keying, DING Xuemei, et al. Dietary administration of resistant starch improved caecal barrier function by enhancing intestinal morphology and modulating microbiota composition in meat duck[J]. *British Journal of Nutrition*, 2019, 123(2): 172–181.
- [33] SONG Xinqi, DONG Huanhuan, ZANG Zhenzhong, et al. Kudzu resistant starch: An effective regulator of type 2 diabetes mellitus[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, 2021: 4448048.
- [34] 夏恩蕊, 张素妍, 田格格, 等. 基于肠道屏障探讨中医药治疗非酒精性脂肪肝的研究进展[J]. *云南中医中药杂志*, 2022, 43(3): 89–93. [XIA Enrui, ZHANG Suyan, TIAN Gege, et al. Research progress of traditional Chinese medicine in the treatment of nonalcoholic fatty liver based on intestinal barrier[J]. *Yunnan Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 43(3): 89–93.]
- [35] KENJI M, HIROKI S, HIROKI M, et al. Resistant starch-supplemented udon noodles prevent impaired glucose tolerance and induce intestinal immunoglobulin-A secretion in mice[J]. *Starch-Stärke*, 2019, 71(9-10): 1900042.
- [36] YUAN H, WANG W, CHEN D, et al. Effects of a treatment with Se-rich rice flour high in resistant starch on enteric dysbiosis and chronic inflammation in diabetic ICR mice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(7): 2068–2074.
- [37] KEYVA A, ALI-REZA K. Methylsulfonylmethane is effective against gastric mucosal injury[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2017, 811: 240–248.
- [38] 曹承嘉. 青稞抗性淀粉的制备及其对酒精性胃损伤的保护作用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020. [CAO Chengjia. Preparation of highland barley resistant starch and its protective effect on alcoholic gastric injury[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.]
- [39] VALCHEVA R, HOTTE N, GILLEVET P, et al. Soluble dextrin fibers alter the intestinal microbiota and reduce proinflammatory cytokine secretion in male IL-10-deficient mice[J]. *The Journal of Nutrition*, 2015, 145(9): 2060–2066.
- [40] 王雨辰, 孔莲花. 抗性淀粉生物学活性研究进展[J]. *肠外与肠内营养*, 2018, 25(5): 313–317. [WANG Yuchen, KONG Lianhua. Research progress on biological activity of resistant starch[J]. *Parenteral and Enteral Nutrition*, 2018, 25(5): 313–317.]
- [41] ROBERTSON M D, BICKERTON A S, DENNIS A L, et al. Insulin-sensitizing effects of dietary resistant starch and effects on skeletal muscle and adipose tissue metabolism[J]. *Am J Clin Nutr*, 2005, 82(3): 559–567.
- [42] 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 Qi. Hypoglycemic effect and mechanism of lotus seed resistant starch[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.]
- [43] BLAAK E E, CANFORA E E, THEIS S, et al. Short chain fatty acids in human gut and metabolic health[J]. *Beneficial Microbes*, 2020, 11(5): 411–455.
- [44] 李颖, 张欣, 杨佳杰, 等. 抗性淀粉改善肠道功能及糖脂代谢的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 326–335. [LI Ying, ZHANG Xin, YANG Jiajie, et al. Research progress of resistant starch in improving intestinal function and glucose and lipid metabolism[J]. *Food Science*, 2020, 41(13): 326–335.]
- [45] 侯康, 李苏艳, 宋丹琳, 等. 胆汁酸与肠道菌群在肠道疾病中的研究进展[J]. *胃肠病学和肝病学杂志*, 2021, 30(12): 1416–1420. [HOU Kang, LI Suyan, SONG Danlin, et al. Research progress of bile acids and intestinal flora in intestinal diseases[J]. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2021, 30(12): 1416–1420.]
- [46] 林珊. 莲子抗性淀粉分级分离及其益生元作用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016. [LIN Shan. Fractionation and prebiotic effect of resistant starch from lotus seeds[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.]
- [47] 包辰. 薏苡仁抗性淀粉结构特性及其对肠道菌群调节机制的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. [BAO Chen. Structural properties of coix seed resistant starch and its regulation mechanism on intestinal flora[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]
- [48] ZENG Hongliang, HUANG Cancan, LIN Shan, et al. Lotus seed resistant starch regulates gut microbiota and increases short-chain fatty acids production and mineral absorption in mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(42): 9217–9225.
- [49] 朱平, 孔祥礼, 包劲松. 抗性淀粉在食品中的应用及功效研究进展[J]. *核农学报*, 2015, 29(2): 327–336. [ZHU Ping, KONG Xiangli, BAO Jinsong. Research progress on the application and efficacy of resistant starch in food[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*,

2015, 29(2): 327–336.]

[50] HUMPHREYS K J, CONLON M A, YOUNG G P, et al. Dietary manipulation of oncogenic microRNA expression in human rectal mucosa: A randomized trial[J]. *Cancer Prevention Research (Philadelphia, Pa.)*, 2014, 7(8): 786–795.

[51] HALD S, SCHIOLDAN A G, MOORE M E, et al. Effects of arabinoxylan and resistant starch on intestinal microbiota and short-chain fatty acids in subjects with metabolic syndrome: A randomised crossover study[J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): 0159223.

[52] 李永清, 逯素梅, 马万山. 肥胖与胰岛素抵抗的关系及其表观遗传学的研究进展[J]. *临床检验杂志*, 2021, 39(4): 310–313.

[LI Yongqing, LU Sumei, MA Wanshan. Research progress on the relationship between obesity and insulin resistance and its epigenetics[J]. *Journal of Clinical Laboratory*, 2021, 39(4): 310–313.]

[53] HUGHES R L, HORN W H, FINNEGAN P, et al. Resistant starch type 2 from wheat reduces postprandial glycemic response with concurrent alterations in gut microbiota composition[J]. *Nutrients*, 2021, 13(2): 645–645.

[54] MENG Yan, BAI Hao, YU Qingtao, 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.

[55] 钱玲玲. 非酒精性脂肪性肝病的诊断及抗性淀粉对其的干预研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020. [QIAN Lingling. Diagnosis of non-alcoholic fatty liver disease and research on the intervention of resistant starch[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020.]

[56] 诸骏仁, 高润霖, 赵水平, 等. 中国成人血脂异常防治指南(2016年修订版)[J]. *中国循环杂志*, 2016, 31(10): 937–953.

[ZHU Junren, GAO Runlin, ZHAO Shuiping, et al. Guidelines for the prevention and treatment of dyslipidemia in adults in China (2016 revision)[J]. *China Circulation Journal*, 2016, 31(10): 937–953.]

[57] 原萌谦, 刘忠诚, 徐斌, 等. 针灸治疗 1528 例肥胖并发高脂血症不同肥胖度患者疗效观察[J]. *中国针灸*, 2016, 36(8): 807–811. [YUAN Mengqian, LIU Zhicheng, XU Bin, et al. Curative effect observation of acupuncture and moxibustion on 1528 obese patients with hyperlipidemia with different degrees of obesity[J]. *China Acupuncture*, 2016, 36(8): 807–811.]

[58] ZHANG Lei, OUYANG Yang, LI Huating, et al. Metabolic phenotypes and the gut microbiota in response to dietary resistant starch type 2 in normal-weight subjects: A randomized crossover trial[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1–11.

[59] DOUPA D, SECK S M, DIA C A, et al. Dyslipidemia, obesity and other cardiovascular risk factors in the adult population in Senegal[J]. *The Pan African Medical Journal*, 2014, 19(1): 181.

[60] NICHENAMETLA S N, WEIDAUER L A, WEY H E, et al. Resistant starch type 4-enriched diet lowered blood cholesterol and improved body composition in a double blind controlled cross-over intervention[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2014, 58(6): 1365–1369.

[61] 孟妍. 黄精联合抗性淀粉对早期糖尿病肾病的影响及其临床研究[D]. 济南: 山东中医药大学, 2019. [MENG Yan. The effect of Huangjing combined with resistant starch on early diabetic nephropathy and its clinical research[D]. Jinan: Shandong University of Traditional Chinese Medicine, 2019.]

[62] YUKO T, YU M, CHIHIO M, et al. The combined effects of soya isoflavones and resistant starch on equol production and trabecular bone loss in ovariectomised mice[J]. *British Journal of Nutrition*, 2016, 116(2): 247–257.

[63] 韩娜. 亚油酸抗性淀粉酯的合成、特性表征及其在药物靶向释放中的应用[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019. [HAN Na. Synthesis, characterization and application of resistant starch ester of linoleic acid and its application in drug targeted release[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.]

[64] CHEN Ling, LI Xiaoxi, PANG Yansheng, et al. Resistant starch as a carrier for oral colon-targeting drug matrix system[J]. *Journal of Materials Science:Materials in Medicine*, 2007, 18(11): 2199–2203.

[65] 肖永霞, 邵秀芝, 曲家妮, 等. 抗性淀粉对面条品质影响的研究[J]. *食品科技*, 2008(10): 32–35. [XIAO Yongxia, SHAO Xizhi, QU Jiani, et al. Study on the effect of resistant starch on noodle quality[J]. *Food Science and Technology*, 2008(10): 32–35.]

[66] 李明刚, 张富丽, 杜荣. 一种富含抗性淀粉粽子及其制备方法: 中国, 112042866A[P]. 2020-12-08. [LI Minggang, ZHANG Fuli, DU Rong. A kind of rice dumplings rich in resistant starch and preparation method thereof: China, 112042866A[P]. 2020-12-08.]

[67] EVELINE L A, YOON K C, CAROLINE J S. Dietary fibre sources in bread: Influence on technological quality[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 545–553.

[68] 贾君, 石彦国, 任露泉. 高膳食纤维 RS 饼干的研究[J]. *粮油加工与食品机械*, 2004(1): 57–59. [JIA Jun, SHI Yanguo, REN Luquan. Research on high dietary fiber RS biscuit[J]. *Grain and Oil Processing and Food Machinery*, 2004(1): 57–59.]

[69] 汤勇铮. 一种含葛根抗性淀粉粗粮面包的制备: 中国, 112970809A[P]. 2021-06-18. [TANG Yongzheng. A kind of preparation of pueraria resistant starch-containing coarse grain bread: China, 112970809A[P]. 2021-06-18.]

[70] BOJARCIUK A, SKAPSKA S, MOUSAVI K A, et al. Health benefits of resistant starch: A review of the literature[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022: 93.

[71] HE Shuqi, XIONG Zixiao, LI Lanxin, et al. Lotus seed resistant starch ameliorates high-fat diet induced hyperlipidemia by fatty acid degradation and glycerolipid metabolism pathways in mouse liver[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 215: 79–91.

[72] 郑亚凤, 郑宝东, 王琦, 等. 一种富含抗性淀粉的番茄莲子咀嚼片及其制备方法: 中国, 104585585A[P]. 2015-05-06. [ZHENG Yafeng, ZHENG Baodong, WANG Qi, et al. A chewable tomato lotus seed tablet rich in resistant starch and its preparation method: China, 104585585A[P]. 2015-05-06.]