

费洪立, 李志江, 阮长青, 等. 抗性淀粉的生理功能及其在食品中的应用 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 425–432. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080206

FEI Hongli, LI Zhijiang, RUAN Changqing, et al. Physiological Function of Resistant Starch and Its Application in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 425–432. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080206

· 专题综述 ·

抗性淀粉的生理功能及其在食品中的应用

费洪立^{1,2,3}, 李志江^{1,2,3,4}, 阮长青^{1,2,3,4,*}, 张东杰^{1,2,3,4,*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163000;

2. 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163000;

3. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163000;

4. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163000)

摘要: 抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 也称为抗酶解淀粉, 它不能在人体小肠中消化吸收, 却可在大肠中被发酵产生对人体有益的短链脂肪酸及其降解产物。抗性淀粉不仅具有预防肠道疾病、稳定餐后血糖水平、降低胆固醇以及抑制脂肪堆积等优良的生理功能, 而且具有色白、热稳定性高、持水性低等独特的食品加工特性, 因此在食品工业中被广泛应用。本文主要综述了抗性淀粉的生理功能及其在食品中的应用, 以期进一步发掘抗性淀粉在医药、饲料等其他行业的潜在应用价值。

关键词: 抗性淀粉, 短链脂肪酸, 肠道疾病, 血糖, 胆固醇, 酸奶, 面制品

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0425-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080206

本文网刊:



Physiological Function of Resistant Starch and Its Application in Food

FEI Hongli^{1,2,3}, LI Zhijiang^{1,2,3,4}, RUAN Changqing^{1,2,3,4,*}, ZHANG Dongjie^{1,2,3,4,*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China;

2. Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing 163000, China;

3. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163000, China;

4. Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, Daqing 163000, China)

Abstract: Resistant starch is also called anti-enzymatic starch. Although it can not be digested and absorbed in the human small intestine, it can be fermented in the large intestine to produce short-chain fatty acids and their degradation products that are beneficial to the human body. Resistant starch not only has excellent physiological functions such as preventing intestinal disease, stabilizing blood glucose levels after meals, reducing cholesterol, and inhibiting fat accumulation, but also has unique food processing characteristics such as white color, high thermal stability, and low water holding capacity. So it is widely used in the food industry. In this paper, the physiological functions of resistant starch and its applications in food are reviewed in order to make further efforts to explore the potential application value of resistant starch in medicine, feed and other industries.

Key words: resistant starch; short-chain fatty acid; intestinal disease; blood sugar; cholesterol; yogurt; pasta product

淀粉多存在于绿色植物的果实、种子、块茎和块根中, 是自然界中含量很丰富的一类碳水化合物, 也

是膳食中不可或缺的原料^[1]。根据淀粉在体外消化速率的不同, 将淀粉分为三类: 快速消化淀粉(RDS)、

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 国家重点研发计划: 杂粮食品精细化加工关键技术合作研究及应用示范 (2018YFE0206300); 黑龙江省自然科学基金研究团队项目: 杂粮与主粮复配科学基础及慢病干预机制 (TD2020C003); 黑龙江省杂粮产业技术协同创新体系杂粮食品加工技术协同创新岗、优势特色学科资助项目 (黑教联 [2018]4 号); 黑龙江八一农垦大学“三横三纵”科研创新团队项目: 杂粮营养与质量安全 (TDJH201806)。

作者简介: 费洪立 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 1697113661@qq.com。

* **通信作者:** 阮长青 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: cqruan@163.com。

张东杰 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: byndzjd@126.com。

缓慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)。抗性淀粉也称抗酶解淀粉,它虽不能在人体小肠中消化吸收,却可在大肠中被发酵产生对人体有益的短链脂肪酸及其降解产物^[2],起到预防肠道疾病、降低胆固醇、抑制脂肪堆积、促进矿物质、维生素的吸收利用以及降低大鼠胃损伤程度等作用。抗性淀粉具有较低的血糖生成指数,可以有效地稳定餐后血糖、控制体重,比膳食纤维有更为广泛的保健作用。此外,抗性淀粉具有不溶于水、热稳定性高、持水性低以及热量低等较好的理化性质,作为新型的、具有保健功能的“食品添加剂”加入到食品中^[3],起到增加食品的脆性、减少食品的膨胀度、改善食品口感等作用。本文重点介绍抗性淀粉的生理功能及其在食品工业中的应用。

1 抗性淀粉的生理功能

1.1 预防肠道疾病

许多微生物在肠道中形成复杂的肠道微生物群落,在人体健康方面发挥着至关重要的作用^[4],研究发现,RS被肠道微生物发酵产生气体和短链脂肪酸、乳酸、琥珀酸等代谢产物^[5],气体能使粪便变得疏松,有利于预防便秘、盲肠炎、痔疮等肠道疾病^[6]。短链脂肪酸可促进结肠和盲肠细胞的生长繁殖,增加与肠道发育有关的基因的表达,创造酸性环境,抑制病原微生物的生长,并且酸性环境会降低与结肠内次级胆汁酸生成有关的酶的活性,从而预防结肠癌等肠道疾病^[7]。

抗性淀粉经肠道菌群发酵后形成的粗糙结构可保护肠道有益菌免受酸性环境的影响,可以作为益生菌生长和生存的基质,选择性地促进有益微生物的生长^[8]。分别使用含有快速消化淀粉和抗性淀粉的饲料喂养小鼠,考察其对肠道菌群的影响,结果表明,含有抗性淀粉的饲料组能够显著地升高放线菌门、拟杆菌门的含量,降低变形菌门、厚壁菌门的含量^[9]。Zhou等^[10]研究发现,莲子抗性淀粉能够促进双歧杆菌增殖,是因为抗性淀粉表面的粗糙结构有利于菌的黏附,并且抗性淀粉降解产生的短链脂肪酸能够刺激双歧杆菌使其增值。另外,由于抗生素的安全问题,在饲料中添加抗生素被一些国家禁止^[11]。使用抗性淀粉作为抗生素的替代品,可以通过修饰和稳定肠道微生物群落、改善宿主的免疫状态来改善肠道健康和功能^[12]。在各项研究中发现,在抗性淀粉摄入量较低或平均水平的人群中,将抗性淀粉摄入量增加一倍,可将结肠癌的风险降低40%^[13]。

因此,抗性淀粉能够促进肠道有益菌的生长、抑制有害物质的产生、稳定肠道微生物群落,进而发挥益生作用^[14],以改善肠道环境、预防肠道疾病。

1.2 稳定餐后血糖

近年来,血糖生成指数(GI)概念在糖尿病和体重管理方面引起了公众和商业的极大兴趣^[15],GI是指一种食品提高餐后血糖水平的能力,高GI食物会迅速地将葡萄糖释放到血液中,而低GI食物会缓慢

地将葡萄糖释放到血液中,可以改善血糖和胰岛素反应^[16]。在健康受试者中,与富含抗性淀粉的面包相比,白小麦面包的血糖生成指数更高,因此,富含抗性淀粉的食物可有效降低血糖指数,在控制糖尿病的代谢方面发挥重要作用^[17]。

一方面,抗性淀粉在小肠中不被消化吸收,可以作为缓慢释放葡萄糖的载体,控制体内葡萄糖释放、稳定餐后血糖^[18]。王蕾蕾等^[19]在研究中发现,食用高抗性淀粉大米的糖尿病患者与食用普通大米的糖尿病患者相比,体脂、空腹血糖及餐后两小时血糖显著降低,说明含高抗性淀粉的大米消化吸收较慢,可有效降低血糖生成指数和糖尿病患者血糖浓度^[19]。同时,Hughes等^[20]连续一周给参与者提供富含抗性淀粉的小麦卷,发现参与者体内的血糖和胰岛素反应显著低于传统小麦卷^[20]。另一方面,抗性淀粉发酵产生的短链脂肪酸可增加胰岛素敏感性,改善糖耐量,减少 β 细胞凋亡^[21-24]。王竹等^[25]分别让受试者食用抗性淀粉、可消化淀粉、葡萄糖,测定餐后胰岛素,结果表明抗性淀粉的ins/glu(胰岛素/血糖,表示机体对胰岛素的敏感性)明显低于可消化淀粉与葡萄糖。抗性淀粉还可降低脂肪组织中的CD11c(补体受体4)的表达,诱导巨噬细胞渗入脂肪组织,促进致炎因子IL-1 β 、IL-6、TNF- α 的释放,导致机体发生胰岛素抵抗从而影响餐后血糖水平和胰岛素分泌^[26]。另外,有其他研究发现,抗性淀粉的降糖作用是通过下调关键酶磷酸烯醇丙酮酸羧激酶(PEPCK)和葡萄糖-6-磷酸酯酶(G6Pase)的表达水平来调节葡萄糖代谢与糖异生^[27],促进葡萄糖代谢与肝糖原合成,降低血糖值。

综上所述,长期摄入含有抗性淀粉的食物有助于糖尿病患者稳定餐后血糖、改善其过氧化应激状态,防止并发症的发生和发展^[28]。

1.3 降低胆固醇、减少胆结石形成

胆固醇又称胆甾醇,是动物组织细胞不可缺少的重要物质,不仅是细胞生物膜的成分,也是类固醇激素、胆汁酸及维生素D的前体物质^[29],尽管胆固醇在人体内具有重要的生理作用,但是对于大多数组织来说,保证胆固醇的供给,维持其代谢平衡是十分重要的^[30],高脂肪、高热量食物的过度摄入改变了血浆中总胆固醇和甘油三酯的水平,成为了高脂血症的重要影响因素^[31]。在大鼠实验中,抗性淀粉饲料(25%生土豆)增加了短链脂肪酸的摄取,并显著降低血浆总胆固醇(TC)和甘油三酯(TG)水平^[32-33],因此,抗性淀粉对降低胆固醇有积极的作用。

一方面,抗性淀粉发酵产生的丁酸通过增强胆汁酸盐水解酶的活性进而增加粪便中游离脂肪酸的排泄^[34],使胆汁醇酸类化合物发生排泄亢进,导致生物合成基质供给速度不平衡,从而影响机体对脂质吸收,减少血液中胆固醇含量。Decker等^[35]给大鼠喂食不同剂量的抗性淀粉,研究结果显示,抗性淀粉组的大鼠粪便中的胆汁酸增加,血液胆固醇和甘油三酯

水平显著降低。另一方面,血清中的丙酸含量与抗性淀粉的摄入量成正相关,研究发现,丙酸具有较好的调节脂质代谢作用^[36]。丙酸对大鼠血清和肝脏脂质浓度影响的结果表明,丙酸是一种纤维发酵的代谢产物,可以介导某些可溶性植物纤维的一些低胆固醇的作用,降低大鼠低密度脂蛋白胆固醇、肝脏胆固醇、TC 和 TG 含量^[37]。

因此,抗性淀粉发酵产生的大量短链脂肪酸中,丙酸起到了降低胆固醇的主要作用,并且影响脂质吸收与脂肪酸合成。然而,有其他研究报道了抗性淀粉的摄入对人类总胆固醇水平的影响非常小,因此,还需要更多的研究来更好地理解抗性淀粉对人体脂质代谢的影响。

除此之外,抗性淀粉还可通过减少胆固醇合成,从而降低胆结石发病率^[38],如中国、印度、美国、澳大利亚这四个国家饮食不同,膳食纤维中抗性淀粉的摄入量有很大区别,导致胆结石的发病率有显著差异^[39]。

1.4 抑制脂肪堆积

肥胖是一个世界性的公共卫生问题,作为一种典型的代谢综合征,会增加患有心血管疾病、肝病以及癌症的风险^[40]。据报道,抗性淀粉可抑制脂肪堆积,预防肥胖^[41]。

一方面,抗性淀粉发酵产生的短链脂肪酸可抑制糖原分解,增加脂肪氧化^[42]。Higgins 等^[43]在研究 RS 对餐后脂肪氧化的影响时发现,将膳食总碳水化合物 5.4% 替换成抗性淀粉后,餐后脂肪氧化显著增加,证明了抗性淀粉在减少脂肪积累中的积极作用。另一方面短链脂肪酸还会促进抗肥胖激素的产生,如肽 YY(PYY)和胰高血糖素样肽-1(GLP-1),抑制食欲相关基因的表达,在脂肪堆积中发挥积极作用^[44]。Li 等^[45]探讨了紫山药抗性淀粉对高脂血症仓鼠脂质代谢的干预作用,高剂量抗性淀粉组比低剂量抗性淀粉组更有效的控制仓鼠体重和脂肪组织质量。邱敏懿等^[46]将抗性淀粉分为高、低剂量组喂食肥胖小鼠,8 周后,发现抗性淀粉高剂量能显著降低小鼠体质量、脂肪质量及体脂率,因此认为抗性淀粉具有良好的抑制脂肪堆积作用,且以高剂量组为佳。

已有大量研究表明抗性淀粉具有益生菌功能,能够抑制脂肪堆积、预防肥胖,但仍需对其抗肥胖相关代谢参数、菌群及相关代谢产物进行系统研究。

1.5 促进矿物质、维生素的吸收利用

抗性淀粉的摄入能够促进矿物质、维生素等营养物质的吸收利用,特别是钙、镁、铁、锌^[47]。一方面,抗性淀粉发酵产生的短链脂肪酸降低了肠道内的 pH,促使矿物质变成可溶性物质,从而增加了矿物质的吸收率^[48]。将抗性淀粉以不同比例加入到基础饲料中喂养大鼠,随着饲料中抗性淀粉添加量的增大,盲肠内容物中铁的溶解度逐渐增加,从而增加了铁的吸收率,说明抗性淀粉可促进人体对铁的吸收,

对改善铁缺乏具有积极作用^[49]。另一方面,短链脂肪酸可加快肠道上皮细胞的增殖速度,使肠壁增大、吸收无机盐的表面积增大,从而促进矿物质的吸收利用^[50]。Morais 等^[51]发现抗性淀粉能明显促进肠道对钙离子和铁离子的吸收。在另一项研究中,研究人员比较了抗性淀粉和可消化淀粉对钙、磷、铁和锌等矿物质的吸收情况,结果表明,与完全可消化淀粉相比,富含抗性淀粉的饲料显著提高了钙和铁的表现吸收^[52]。

此外,抗性淀粉还能促进铅从体内排出,因为体内钙、铁、锌的增加,从而能竞争性抑制铅的吸收。并且抗性淀粉对铅有较好的吸附能力,可使铅在盲肠与其中的微生物结合而随粪便排出体外。杨参在研究中发现,甘薯抗性淀粉对铅的吸附率为 62.4%,而糊化淀粉为 25.8%,生淀粉为 38.9%,说明抗性淀粉对铅有较强的吸附能力,对于铅中毒大鼠具有明显的促排铅作用^[53]。

1.6 降低胃损伤程度

胃损伤是一种常见的消化系统疾病^[54],世界人口中有 5%~10% 受到此疾病或其并发症的影响^[55]。一次过量摄入高浓度的酒精会引起许多代谢障碍和功能变化,引起急性胃黏膜发炎^[56],使胃黏膜失去弹性,出现片状出血和严重的糜烂,造成严重的胃损伤。

一方面,不被消化的抗性淀粉进入排泄物,稀释无法代谢的有害物质,减少肠胃的运转时间,加速胃排空^[57],胃排空运动可以减少乙醇在胃黏膜上的作用,有助于降低胃部所受的损害。另一方面,抗性淀粉发酵产生丁酸通过结肠壁被吸收后进入血液循环,可以为肌肉和上皮提供能量,增强免疫调节功能并且降低诱变物的潜在毒性,从而产生胃保护作用^[58]。蹇宇等^[59-60]发现抗性淀粉能够显著提高 HCl-乙醇诱导 SD 大鼠胃损伤的抑制率,减少胃液的分泌量,降低 SD 大鼠胃损伤程度,表现出一定的胃损伤预防效果。除此之外,曹承嘉^[61]研究发现,抗性淀粉对乙醇诱导的急性酒精性胃损伤有一定的预防作用,与调节氧化应激、炎症因子和改善中性粒细胞浸润有关,抗性淀粉预处理能显著降低胃损伤程度,改善胃黏膜出现的出血及糜烂状态,抗性淀粉高剂量组最高可达到 50.77% 的胃保护率(表 1)。

2 抗性淀粉在食品中的应用

2.1 在酸奶制品中的应用

酸奶是我国乳制品中产量增长最快的品种,有促进胃液分泌、提高食欲、加强消化等功效。抗性淀粉应用于酸奶制品中可进一步提高酸奶的营养价值、增强酸奶保健功能。一方面,抗性淀粉是双歧杆菌、乳酸杆菌等益生菌繁殖的合适底物,含抗性淀粉的酸奶中乳酸杆菌的数量明显高于对照组,并且进入人体后菌体的存活率显著提高^[62],增强了酸奶的保健功能。

另一方面,抗性淀粉的加入可以提高酸奶的粘

表 1 抗性淀粉的生理功能

Table 1 Physiological functions of resistant starch

生理功能	载体	作用机制	文献来源
预防肠道疾病	短链脂肪酸	创造酸性环境, 抑制病原微生物生长	[7]
	粗糙结构	保护肠道有益菌	[8]
	分子结构	作为缓慢释放葡萄糖的载体, 控制体内葡萄糖释放	[18]
稳定餐后血糖	短链脂肪酸	增加胰岛素敏感性, 减少 β 细胞凋亡	[21-24]
	短链脂肪酸	调节葡萄糖代谢与糖异生	[27]
降低胆固醇	丁酸	使胆汁醇酸类化合物发生排泄亢进、生物合成基质供给速度不平衡	[34]
	丙酸	介导某些可溶性植物纤维	[37]
抑制脂肪堆积	短链脂肪酸	抑制糖原分解, 增加脂肪氧化	[42]
	短链脂肪酸	促进抗肥胖激素的产生	[44]
促进矿物质、维生素的吸收利用	短链脂肪酸	降低肠道内pH, 使矿物质变成可溶性物质	[48]
	短链脂肪酸	加快肠道上皮细胞的增殖速度, 使肠壁增大、吸收无机盐的表面积增大	[50]
	分子结构	稀释无法代谢的有害物质, 加速胃排空	[57]
降低胃损伤程度	丁酸	为肌肉和上皮提供能量, 增强免疫调节功能并且降低诱变物的潜在毒性	[58]
	丁酸	调节氧化应激、炎症因子和改善中性粒细胞浸润	[61]

度、改善酸奶的感官品质^[63], 将抗性淀粉作为增稠剂添加到搅拌型酸奶中, 可增加酸奶的不透明度和悬浮度, 影响酸奶的乳清析出量^[64], 比普通酸奶的口感更加顺滑, 酸甜适口, 感官品质达到最佳。因此, 将抗性淀粉添加到酸奶中, 既提高酸奶中菌种存活率、又可很好的提高酸奶的品质, 具有更强的益生菌作用。

2.2 在油炸食品中的应用

油炸是一种常见的烹饪方法, 油炸过程中会发生淀粉糊化、蛋白质变性和非酶褐变等营养品质下降的变化^[65]。在油炸食品中添加部分抗性淀粉, 可避免油炸食品发生营养成分的不利变化。

为了达到改善产品质量并实现低脂化的效果, 可将抗性淀粉添加到油炸食品中, 抗性淀粉含量与直链淀粉含量呈正相关, 而直链淀粉可以抑制淀粉颗粒结构的解体, 提高油炸食品的酥脆度^[66]。同时, 由于美拉德反应和焦糖反应, 抗性淀粉的添加可以提高油炸后食品外壳的黄度值和脆性。此外, 抗性淀粉具有较高的耐热性, 在高温下几乎没有损失, 符合油炸所需高温。因此, 将抗性淀粉加入到油炸食品中, 使产品外观颜色更加鲜亮, 口感更加松脆, 同时实现低脂、高纤维, 避免油炸食品营养流失。

2.3 在面制品中的应用

将抗性淀粉添加到面包、馒头、饼干、面条等面制品中, 充分满足了不同层次人群对健康饮食的需求^[67]。使用部分抗性淀粉替代精制面粉制作面包, 可有效降低健康成年人餐后的葡萄糖和胰岛素反应, 提高食物中膳食纤维含量^[68], 并且对面包的感官品质无明显影响。郝欣等^[69]依据感官评定标准进行评价, 出于对肥胖者饮食、营养需求的考虑, 以青香蕉粉为主要原料, 制作出了一款健康营养的代餐饼干。另外, 抗性淀粉会影响面团的流变学特性, 面团的吸水率会随着抗性淀粉的增加而提高。将 5% 的抗性淀粉加入到面条中, 可降低面条的黏弹性^[70], 有利于减少咀嚼, 增加饱腹感, 降低人体内可消化碳水化合物

的摄入量, 并且对面条的烹煮特性影响不大^[71]。因此, 在面制品中添加适量的抗性淀粉, 能够使面食制品的性能风味更佳, 更能满足消费者的需要。

2.4 在肉制品中的应用

肉制品是指用畜禽肉为主要原料, 经调味制作的熟肉成品或半成品^[72]。将抗性淀粉代替部分淀粉加入到香肠中后, 发现肉糜的保水性逐渐提高, 当抗性淀粉的替代量为 80% 时, 香肠的硬度和弹性都达到最佳, 综合品质达到最好^[73]。抗性淀粉加入到香肠中可以达到保水保汁、增加肉制品的弹性等效果, 一方面, 因为抗性淀粉颗粒的强渗透性, 使得体系中的游离水渗入抗性淀粉颗粒中, 并与抗性淀粉分子中游离的羟基形成氢键水合物, 使体系中的游离水分会显著减少、结合水增加^[74], 肉糜的保水性提高。

另一方面, 因为抗性淀粉与肉中的肌球蛋白形成凝胶, 抗性淀粉的亲水性和凝胶内部水的流动性有助于保留肉制品的水分和汁液^[75]。例如将玉米抗性淀粉加入到鸡肉中, 发现抗性淀粉可以吸收凝胶混合体系中的水分从而降低内部凝胶的流动性, 形成连续、致密、均匀的三维网络结构, 增强凝胶强度^[76]。通过以上研究可以发现, 将抗性淀粉应用到肉制品中, 可以提高产品的弹性、凝胶强度并且起到抑制脂质氧化的作用^[77](表 2)。

3 结论与展望

抗性淀粉作为一种新型膳食纤维, 既可以作为辅料用于食品, 也可以作为原料加工利用, 具有预防肠道疾病、稳定餐后血糖、降低胆固醇、抑制脂肪堆积、促进矿物质、维生素的吸收利用和降低胃损伤程度等生理功能, 应用在食品工业中能够增加食品的脆性、改善色泽和降低膨胀度等, 并且抗性淀粉对食物感官特性的影响较小, 对保障机体健康有着积极的影响。

抗性淀粉在结肠发酵、短链脂肪酸的产生以及某些基因表达水平的调控发挥作用, 但在生化和分子

表 2 抗性淀粉在食品中的应用
Table 2 Application of resistant starch in food

应用产品	作用机制	品质改善	文献来源
酸奶制品	抗性淀粉是益生菌繁殖的合适底物	提高益生菌数量	[62]
	抗性淀粉具有较好的黏度稳定性、流变特性及低持水性	增加不透明度和悬浮度	[63–64]
油炸食品	抗性淀粉中富含直链淀粉,抑制淀粉颗粒结构的解体	提高酥脆度	[66]
	美拉德反应、焦糖反应	提高黄度值和脆性	[66]
面制品	抗性淀粉性质类似于膳食纤维	提高膳食纤维含量	[68]
	抗性淀粉制备时发生糊化,吸水能力增强	提高面团的吸水率	[70]
肉制品	抗性淀粉颗粒的强渗透性,使游离水减少、结合水增加	提高肉糜的保水性	[74–75]
	抗性淀粉与肉中的肌球蛋白形成凝胶,凝胶内部水的流动性有助于保留肉制品的水分和汁液		

机制的研究还不够明确。不同食物来源的抗性淀粉生理功能是否存在差异,以及抗性淀粉与脂类、果胶及蛋白等形成复合物的加工特性有待进一步研究。此外,有研究表明抗性淀粉可能与减少组织学损伤和改善炎症性肠病有关,因此,可将抗性淀粉加入到临床治疗中,使其作为一种联合治疗手段以放大治疗效果,但仍需进行严格的临床研究。未来,基于消费者对于抗性淀粉的特定需求,进一步开发功能性食品,以期发掘抗性淀粉在医药、饲料等其他行业的潜在应用价值。

参考文献

- [1] 杨艺. 不溶性膳食纤维的添加对面包品质影响机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [YANG Y. Study on the effect mechanism of insoluble dietary fiber on bread quality[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
- [2] ENGLYST H N, CUMMINGS J H. Digestion of the polysaccharides of some cereal foods in the human small intestine[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1985, 42(5): 778–787.
- [3] WANG K P, KARIN M. Common flora and intestine: A carcinogenic marriage[J]. *Cellular Logistics*, 2013, 3(1): 1–4.
- [4] FU J F, WANG Y T, TAN S M, et al. Effects of banana resistant starch on the biochemical indexes and intestinal flora of obese rats induced by a high-fat diet and their correlation analysis[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 1–14.
- [5] EMANUEL E C, RUTH C R M, KOEN V, et al. Gut microbial metabolites in obesity, NAFLD and T2DM[J]. *Nature Reviews Endocrinology*, 2019, 15(5): 261–274.
- [6] 闫国森, 郑环宇, 孙美馨, 等. 抗性淀粉生理功能及作用机制的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 330–337. [YAN G S, ZHANG H Y, SUN M X, et al. Research progress on physiological function and mechanism of resistant starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(21): 330–337.]
- [7] XIN L, TIAN X Y, ZHANG H X, et al. Exercise as a prescription for patients with various diseases[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2019, 8(5): 422–441.
- [8] KIEFFER D A, PICCOLO B D, MARCO M L, et al. Mice fed a high-fat diet supplemented with resistant starch display marked shifts in the liver metabolome concurrent with altered gut bacteria[J]. *The Journal of Nutrition*, 2016, 146(12): 2476–2490.
- [9] ZHANG Y, ZENG H L, WANG Y, et al. Structural characteristics and crystalline properties of lotus seed resistant starch and its prebiotic effects[J]. *Food Chemistry*, 2014, 155: 311–318.
- [10] ZHOU L, FANG L, SUN Y, et al. Effects of a diet high in resistant starch on fermentation end-products of protein and mucin secretion in the colons of pigs[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(7-8): 1–7.
- [11] YOUCEF M, MARIE P, GAUCHER M L, et al. Use of antibiotics in broiler production: Global impacts and alternatives[J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(2): 170–178.
- [12] GE Y F, WEI C H, WANG W H, et al. The resistant starch from sorghum regulates lipid metabolism in menopausal rats via equol[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(8): 13295–13305.
- [13] 王如月. 燕麦多糖及其寡糖的制备与对肠道微生物的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [WANG R Y. Preparation of oat polysaccharides and oligosaccharides and their effects on intestinal microbes[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
- [14] ALEMU R, CHARLES M N. Application of resistant starch in swine and poultry diets with particular reference to gut health and function[J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(3): 305–310.
- [15] NICOLETTA P, CARLO A. Nutritional aspects of gluten-free products[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(12): 2380–2385.
- [16] DONA A C, PAGES G, GILBERT R G. Digestion of starch: *In vivo* and *in vitro* kinetic models used to characterise oligosaccharide or glucose release[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 80: 599–617.
- [17] RABEN A, TAGLIABUE A, CHRISTENSEN N J, et al. Resistant starch: The effect on postprandial glycemia, hormonal response, and satiety[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1994, 60(4): 544–551.
- [18] KUMAR L M, KUMAR T R, RAVINDER K, et al. Effect of potato apical leaf curl disease on glycemic index and resistant starch of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 123399–123399.
- [19] 王蕾蕾, 何芳, 樊慧茹, 等. 高抗性淀粉大米血糖生成指数测定及对糖尿病患者血糖调控的干预研究[J]. *营养学报*, 2017, 39(2): 197–199. [WANG L L, HE F, FAN H R, et al. Measurement of glycemic index of highly resistant starch rice and intervention study on blood glucose regulation of diabetic patients[J]. *Journal of Nutrition*, 2017, 39(2): 197–199.]
- [20] 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.

[21] KHAN S, JENA G B. Protective role of sodium butyrate, a HDAC inhibitor on beta-cell proliferation, function and glucose homeostasis through modulation of p38/ERK MAPK and apoptotic pathways: Study in juvenile diabetic rat[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2014, 213(2): 1–12.

[22] CHENLIN G, MINGYUE R, WEI H, et al. Resistant starch ameliorated insulin resistant in patients of type 2 diabetes with obesity: A systematic review and meta-analysis[J]. *Lipids in Health and Disease*, 2019, 18(8): 271–281.

[23] HARAZAKI T, INOUE S, IMAI C, et al. Resistant starch improves insulin resistance and reduces adipose tissue weight and CD11c expression in rat OLETF adipose tissue[J]. *Nutrition*, 2014, 30(5): 590–595.

[24] ZHANG L, LI H T, SHEN L, et al. Effect of dietary resistant starch on prevention and treatment of obesity-related diseases and its possible mechanisms[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2015, 28(4): 291–297.

[25] 王竹, 杨月欣, 周瑞华, 等. 抗性淀粉的代谢及对血糖的调节作用[J]. *营养学报*, 2003(2): 190–195. [WANG Z, YANG Y X, ZHOU R H, et al. Metabolism of resistant starch and its regulating effect on blood sugar[J]. *Journal of Nutrition*, 2003(2): 190–195.]

[26] SUN H, MA X, ZHANG S, et al. Resistant starch produces antidiabetic effects by enhancing glucose metabolism and ameliorating pancreatic dysfunction in type 2 diabetic rats[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 110: 276–284.

[27] KENDALL C W C, ESFAHANI A, HOFFMAN A J. Effect of novel maize-based dietary fibers on postprandial glycemia and insulinemia[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2008, 27(6): 711–718.

[28] BERDUGO M, DELAUNAY K, LEBON C. Long-term oral treatment with non-hypoglycemic dose of glibenclamide reduces diabetic retinopathy damage in the goto-kakizakirrat model[J]. *Pharmaceutics*, 2021, 13(7): 1–16.

[29] 张磊. 辣椒碱降大鼠胆固醇效果及其分子机理的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [ZHANG L. Study on the effect of capsaicin on lowering cholesterol in rats and its molecular mechanism [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.]

[30] 廖端芳, 唐朝克. 胆固醇逆向转运基础与临床[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1–26. [LIAO D F, TANG C K. Basic and clinical of reverse cholesterol transport[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1–26.]

[31] 于森, 邹应龙. 甘薯抗性淀粉对高脂血症大鼠降脂利肝作用研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(1): 244–247. [YU M, WU Y L. Study on the effect of sweet potato resistant starch on reducing lipid and benefiting liver in hyperlipidemia rats[J]. *Food Science*, 2012, 33(1): 244–247.]

[32] MERVE A, KEVSER K, HAMIT K. *In vitro* glycemic index, bile acid binding capacity and mineral bioavailability of spaghetti supplemented with resistant starch type 4 and wheat bran[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 65(C): 1–10.

[33] 万佳玮. 不同抗性淀粉含量的大米对高脂饮食小鼠脂质代谢和肠道菌群的调控研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.

[WAN J W. Study on the regulation of different resistant starch content rice on lipid metabolism and intestinal flora in high-fat diet mice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.]

[34] MANINDER M, BAOJUN X. A critical review on anti-diabetic and anti-obesity effects of dietary resistant starch[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(18): 3019–3031.

[35] DECKER T, WEIGEL S, KORSCHING E, et al. Minimal invasive biopsy results of uncertain malignant potential in digital mammography screening: High prevalence but also high predictive value for malignancy[J]. *Fortschr Rntgenstr*, 2011, 183(8): 743–748.

[36] 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 Z Z, HAO Z S, MEN Y, et al. Research progress in preparation and application of resistant starch[J]. *Food and Nutrition in China*, 2021, 27(1): 30–35.]

[37] VICTORIA H, KHOSROW A. Postprandial dyslipidemia in insulin resistant states in adolescent populations[J]. *The Journal of Biomedical Research*, 2020, 34(5): 328–342.

[38] RAIGOND P, EZEKIEL R, RAIGOND B. Resistant starch in food: A review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(10): 1968–1978.

[39] SAJILATA M G, SINGHAL R S, KULKARNI P R. Resistant starch: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2006, 5(1): 1–17.

[40] DAMSGAARD C T, MICHAELSEN K F, MOLBO D, et al. Trends in adult body-mass index in 200 countries from 1975 to 2014: A pooled analysis of 1698 population-based measurement studies with 19.2 million participants[J]. *The Lancet*, 2016, 387: 1377–1396.

[41] LIANG D, ZHANG L, CHEN H Z, et al. Potato resistant starch inhibits diet-induced obesity by modifying the composition of intestinal microbiota and their metabolites in obese mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 180: 458–469.

[42] NUGENT A P. Health properties of resistant starch[J]. *Nutrition Bulletin*, 2005, 30(1): 27–54.

[43] HIGGINS J A. Resistant starch: Metabolic effects and potential health benefits[J]. *Journal of AOAC International*, 2004, 87(3): 761–768.

[44] LANG S J, SCHNABL B. Microbiota and fatty liver disease—the known, the unknown, and the future[J]. *Cell Host & Microbe*, 2020, 28(2): 233–244.

[45] LI T, TENG H, AN F P, et al. The beneficial effects of purple yam (*Dioscorea alata* L.) resistant starch on hyperlipidemia in high-fat-fed hamsters[J]. *Food & Function*, 2019, 10(5): 2642–2650.

[46] 邱敏懿, 晋小雁, 张彩娟, 等. RS3型芭蕉芋抗性淀粉的减肥降脂作用及急性毒性分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(1): 149–156. [QIU M Y, JIN X Y, ZHANG C J, et al. The weight loss and lipid-lowering effects of RS3 plantain resistant

- starch and its acute toxicity analysis[J]. *Chinese Journal of Experimental Formulas*, 2019, 25(1): 149–156.]
- [47] LONNERDAL B. Dietary factors influencing zinc absorption[J]. *The Journal of Nutrition*, 2000, 130(5S): S1378–S1383.
- [48] YOUNES H. Effects of two fermentable carbohydrates (inulin and resistant starch) and their combination on calcium and magnesium balance in rats[J]. *Br J Nutr*, 2001, 86(4): 479–485.
- [49] 李淑荣, 张丽萍, 安建钢, 等. RS-3 对大鼠微量元素铁、锰吸收的影响[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(12): 55–58, 253. [LI S R, ZHANG L P, AN J G, et al. Effect of RS-3 on the absorption of trace elements iron and manganese in rats[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2016, 32(12): 55–58, 253.]
- [50] 李海枝, 田巧基, 韩晓峰, 等. 益生元促钙吸收作用的研究进展[J]. *食品科技*, 2020, 45(9): 51–56. [LI H Z, TIAN Q J, HAN X F, et al. Research progress of prebiotics in promoting calcium absorption[J]. *Food Technology*, 2020, 45(9): 51–56.]
- [51] MORAIS M B, FESTE A, MILLER R G, et al. Effect of resistant and digestible starch on intestinal absorption of calcium, iron, and zinc in infant pigs[J]. *Pediatric Research*, 1996, 39(5): 872–876.
- [52] WANG H S, PANG G C. Effect of resistant and digestible rice starches on human cytokine and lactate metabolic networks in serum[J]. *Cytokine*, 2017, 93: 57–65.
- [53] 杨参. 甘薯抗性淀粉对大鼠矿物质元素吸收的影响研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2003. [YANG S. Study on the effect of sweet potato resistant starch on the absorption of mineral elements in rats[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2003.]
- [54] YANG Y, YIN B, LÜ L, et al. Gastroprotective effect of aucubin against ethanol-induced gastric mucosal injury in mice[J]. *Life Sciences*, 2017, 189: 44–51.
- [55] SONG S H, KIM J E, SUNG J E, et al. Anti-ulcer effect of Gallarhois extract with anti-oxidant activity in an ICR model of ethanol/hydrochloride acid-induced gastric injury[J]. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 2019, 9(4): 372–382.
- [56] CHEN S C, ZHAO X, SUN P, et al. Preventive effect of *Gardenia jasminoides* on HCl/ethanol induced gastric injury in mice[J]. *Journal of Pharmacological Sciences*, 2016, 133(1): 1–8.
- [57] PRETER V D, CLOETENS L, RUTGEERTS P. Influence of resistant starch alone or combined with wheat bran on gastric emptying and protein digestion in healthy volunteers[J]. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, 2007, 42(10): 1187–1193.
- [58] FERGUSON L R, TASMAN-JONES C, ENGLYST H. Comparative effects of three resistant starch preparations on transit time and short-chain fatty acid production in rats[J]. *Nutrition and Cancer*, 2000, 36(2): 230–237.
- [59] 骞宇, 赵欣. 抗性淀粉对 SD 大鼠的胃损伤预防效果研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 241–245. [QIAN Y, ZHAO X. Study on the preventive effect of resistant starch on gastric injury in sd rats[J]. *Food Science*, 2014, 35(11): 241–245.]
- [60] 骞宇. 抗消化淀粉对实验鼠肠道生理环境和胃肠功能性作用的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [QIAN Y. Effects of anti-digestible starch on intestinal physiological environment and gastrointestinal function in laboratory mice[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.]
- [61] 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 C J. Study on preparation of highland barley resistant starch and its protective effect on alcoholic gastric injury[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.]
- [62] 白永亮, 陈庆发, 杜冰, 等. 香蕉抗性淀粉保健酸奶的研制[J]. *食品科学*, 2012, 33(16): 318–323. [BAI Y L, CHEN Q F, DU B, et al. Development of banana resistant starch health care yoghurt[J]. *Food Science*, 2012, 33(16): 318–323.]
- [63] REZAEI R, KHOMEIRI M, KASHANINEJAD M, et al. Effect of resistant starch and aging conditions on the physicochemical properties of frozen soy yogurt[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 8164–8171.
- [64] HE J, HAN Y, LIU M, et al. Effect of 2 types of resistant starches on the quality of yogurt[J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(5): 3956–3964.
- [65] BALJEET S Y. Effect of frying, baking and storage conditions on resistant starch content of foods[J]. *British Food Journal*, 2011, 113(6): 710–719.
- [66] BLANCH G P, CASTILLO M L R D. Effect of baking temperature on the phenolic content and antioxidant activity of black corn (*Zea mays* L.) bread[J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1202.
- [67] ZHANG J, XIE T T, FAN L P. Improving the quality and reducing oil absorption of fried potato chips by ultrasound pretreatment[J]. *LWT*, 2021, 148: 1–8.
- [68] DJURLE S, ANDERSSON A A M, ANDERSSON R. Effects of baking on dietary fibre, with emphasis on β -glucan and resistant starch, in barley breads[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 449–455.
- [69] 郝欣, 陈菲, 王娟. 香蕉抗性淀粉饼干的加工工艺研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(1): 223–227. [HAO X, CHEN F, WANG J. Study on processing technology of banana resistant starch biscuit[J]. *Food Technology*, 2019, 44(1): 223–227.]
- [70] PUNIA S, SIROHA A K, SANDHU K S, et al. Rheological behavior of wheat starch and barley resistant starch (type IV) blends and their starch noodles making potential[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 130: 595–604.
- [71] LUKAS K, LUCIA M, MICHAELA L, et al. Pasta noodles enriched with sweet potato starch: Impact on quality parameters and resistant starch content[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(3): 464–474.
- [72] LI X, LEI S, LIU L, et al. Synergistic effect of lotus seed resistant starch and short-chain fatty acids on mice fecal microbiota *in vitro*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 2272–2281.
- [73] 王兆龙, 张锦胜, 钱菲, 等. 核磁共振技术研究玉米抗性淀粉对香肠品质的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(7): 38–42. [WANG Z L, ZHANG J S, QIAN F, et al. The effect of corn resistant starch on sausage quality was studied by NMR[J]. *Food Science*, 2011, 32(7): 38–42.]
- [74] 王菲, 杨留枝, 闫溢哲, 等. 抗性淀粉在食品中的应用[J].

食品科技, 2020, 45(4): 238-242. [WANG F, YANG L Z, YAN Y Z, et al. Application of resistant starch in food[J]. *Food Technology*, 2020, 45(4): 238-242.]

[75] 李月双. 玉米抗性淀粉与超高压对肌球蛋白凝胶特性的影响 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. [LI Y S. Effects of maize resistant starch and ultrahigh pressure on myosin gel properties[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.]

[76] 胡方洋, 张坤生, 陈金玉, 等. 玉米抗性淀粉的制备及其对肌

原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 1-6. [HU F Y, ZHANG K S, CHEN J Y, et al. Preparation of maize resistant starch and its effect on myofibrin gel properties[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(7): 1-6.]

[77] ACOSTA-PEREZ V J, ZAMUDIO F P B, ORNELAS-PAZ J D J, et al. Effects of native and modified starches on the physico-chemical and textural properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fish burgers[J]. *CYTA: Journal of Food*, 2019, 17(1): 207-213.