

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.015

赵晶, 刘新雨, 张振宇, 等. III型抗性淀粉在发酵乳中的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 116-123.

ZHAO J, LIU X Y, ZHANG Z Y, et al. Research progress of type III resistant starch in fermented milk[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 116-123.

# III型抗性淀粉在发酵乳中的研究进展

赵 晶, 刘新雨, 张振宇, 王红梅, 张 岚, 朱萌萌

(黑龙江东方学院 食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150066)

**摘 要:** 抗性淀粉有益于调节肠道菌群, 改善肠道功能, 控制胆固醇水平和血糖指数。近些年最受关注的是抗性淀粉的益生元效应。发酵乳被认为是益生菌与益生元最佳载体, 将III型抗性淀粉加于发酵乳中不仅可以改善发酵乳品质, 还可以发挥益生元效应, 增强发酵乳的功能性。简要介绍了抗性淀粉与益生元的关系, 概述了III型抗性淀粉在发酵乳中的应用, 阐述了III型抗性淀粉对发酵乳品质的影响及其益生性评价, 以期为III型抗性淀粉在功能性发酵乳的应用提供参考。

**关键词:** 抗性淀粉; 益生元; 发酵乳; 品质; 研究进展

中图分类号: TS252.54 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0116-08

## Research Progress of Type III Resistant Starch in Fermented Milk

ZHAO Jing, LIU Xin-yu, ZHANG Zhen-yu, WANG Hong-mei, ZHANG Lan, ZHU Meng-meng

(College of Food Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin, Heilongjiang 150066, China)

**Abstract:** Resistant starch has the benefits in the regulation of intestinal flora, improvement of intestinal function, control of cholesterol levels and glycemic index. In recent years, the most concerned is the prebiotic effect of resistant starch. Fermented milk has been considered as the best carrier of probiotics and prebiotics. Adding type III resistant starch to fermented milk could not only improve the quality of fermented milk, but also enhance the functionality of fermented milk. This paper briefly introduced the relationships between resistant starch and prebiotics, and summarized the application of type III resistant starch in fermented milk. This paper also expounded the effect of type III resistant starch on the quality of fermented milk and its probiotic evaluation, which could provide reference for the application and development of type III resistant starch in functional fermented milk.

**Key words:** resistant starch; probiotics; fermented milk; quality; research progress

近年来, 功能性食品深受研发人员和消费者

的重视, 促使其需求量不断增加。例如, 以益生菌、益生元载体闻名的发酵乳制品。因此, 如何充分发挥益生菌发酵乳制品益生功能的同时保证其风味, 是亟待解决的问题。抗性淀粉是一种在小肠内不能被宿主消化酶分解, 但能被结肠内部微生物发酵的膳食纤维成分<sup>[1]</sup>。因此, 抗性淀

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021C077)

Supported by: Heilongjiang Province Natural Science Foundation project (No. LH2021C077)

作者简介: 赵晶, 女, 1978 年出生, 硕士, 副教授, 研究方向为食品加工技术。E-mail: zhaojing\_ok@163.com.

粉不会在小肠内释放单糖,而是产生多种短链脂肪酸,在机体代谢和维护肠道健康中发挥重要作用。例如,低热量、易饱腹、降血糖、降胆固醇、抑制脂肪堆积、增加矿物质吸收、预防结肠癌和预防胆结石的形成<sup>[2-6]</sup>。抗性淀粉可分为 5 类:RS<sub>1</sub>,物理包埋淀粉;RS<sub>2</sub>,天然淀粉颗粒;RS<sub>3</sub>,回生淀粉;RS<sub>4</sub>,化学改性淀粉;RS<sub>5</sub>,直链淀粉-脂质复合物<sup>[7]</sup>。在食品研发与生产领域获得极大关注的属 RS<sub>3</sub> 型,RS<sub>3</sub> 融化温度大约在 155 °C,因此在烹饪过程中热稳定性好,充分保留营养功能。RS<sub>3</sub> 应用于发酵乳中还能够保证其稳定性与持水性,提高品质,增强口感,延长货架期<sup>[8]</sup>。本文介绍了抗性淀粉与益生元的关系以及 RS<sub>3</sub> 在发酵乳中应用概况,分析讨论 RS<sub>3</sub> 对发酵乳的品质影响以及益生评价的重要性,同时对 RS<sub>3</sub> 在功能性发酵乳中应用与未来发展进行展望。

## 1 抗性淀粉与益生元的关系

益生元是微生物选择利用的发酵底物,有利于宿主的健康。Bindels<sup>[9]</sup>等将益生元定义为一种不可消化的化合物,通过肠道中微生物的代谢,调节肠道菌群的组成和/或活性,从而为宿主带来有益的生理效应。这一新概念将益生元作用重点转移到与宿主生理学相关的菌群生态和功能特征上,更广泛关注于有利于人体健康的物质。大量研究表明摄入膳食纤维对肠道菌群平衡和健康有显著影响<sup>[10-11]</sup>,然而并非所有膳食纤维都可以归类为益生元。目前在文献中有详细记载的益生元只有抗性低聚糖、低聚果糖、低聚半乳糖和菊粉<sup>[12]</sup>。

抗性淀粉是一种新型的膳食纤维资源<sup>[13]</sup>,根据益生元标准分类可将其归类为益生元候选膳食纤维<sup>[14]</sup>。这种归类可以帮助研究人员更好研究抗性淀粉所显示的益生元特性,从而制定关于抗性淀粉食品研发指南,有利于富含抗性淀粉的产品加工生产。目前,已有许多相关研究通过动物试验和人类粪便样品的体外试验来研究抗性淀粉作为益生元的有效性。然而,由于淀粉来源的多样性,很难断定该抗性淀粉是益生元候选者,一般来讲,抗性淀粉必须满足以下标准才能被完全确定为益生元<sup>[15]</sup>。1)能够抵抗胃酸和消化酶的分解;2)保持完整到达结肠,可被肠道微生物群发

酵;3)有选择性地刺激肠道微生物群生长和/或活性的能力。

近年来,人们对抗性淀粉的兴趣与日俱增,主要原因就是抗性淀粉对胃肠道的作用。与可溶性膳食纤维一样,抗性淀粉是结肠微生物群利用的底物,产生包括短链脂肪酸在内的代谢产物,即主要是乙酸、丙酸和丁酸,其中丁酸是细胞最重要的能量来源<sup>[16]</sup>。

抗性淀粉不会被人体肠道内消化酶降解,只能在结肠中发酵分解,因此可以减少葡萄糖的转化量,从而降低血液中的含糖量。肖兵<sup>[17]</sup>在研究玉米 RS<sub>3</sub> 时,发现喂食 RS<sub>3</sub> 的小鼠与控制组小鼠血糖值相差 25.60%,前者血糖值下降 14.7%,可以表明 RS<sub>3</sub> 能够控制糖尿病小鼠的血糖。不仅仅是在动物试验中,在大量的人体试验中也表明 RS<sub>3</sub> 有控制血糖、调节胰岛素的分泌,从而保证身体健康的效果。

抗性淀粉还具有益生元特性,如减少氧化应激作用<sup>[18]</sup>,调节肠道 pH 环境<sup>[19]</sup>,改善矿物吸收状况<sup>[20]</sup>。Zhou<sup>[21]</sup>等提出荞麦抗性淀粉(BRS)通过改善肠道菌群失调,以制炎症并增加短链脂肪酸(SCFA),从而预防糖尿病。摄入 BRS 还可以防止高血脂症小鼠发生胰岛素抵抗和高甘油三脂血症。

## 2 发酵乳作为益生菌载体的优势

发酵是一种利用微生物的生命活动来保存食物的技术。在发酵过程中,可发酵的碳水化合物被分解成有机酸、二氧化碳和酒精<sup>[22]</sup>。此外,产生抗菌代谢产物(如细菌素),改善营养状况和食品感官特性,减少抗营养因素(如乳糖不耐)等是发酵的额外优势<sup>[23]</sup>。发酵乳因具有特殊的感官特性、健康益处和较好的保质期成为最受欢迎的发酵产品之一<sup>[24]</sup>,同时也是益生菌的良好载体。目前市售的功能食品绝大部分属于益生菌食品<sup>[25]</sup>。当益生菌数量到达一定值时,可以通过平衡肠道菌<sup>[26]</sup>进而起到免疫调节、降低血清胆固醇、抗突变和抗癌、缓解乳糖不耐受症状、增强防御机制、改善肠道屏障功能和提高营养价值等多种疗效<sup>[27-28]</sup>。乳制品基质适合益生菌的增殖,蛋白质和乳糖的水解能够提高酪蛋白利用率,为益生菌提供了丰

富的碳源和氮源<sup>[29]</sup>。此外,牛奶能够起到缓冲和保护作用,帮助益生菌更好地耐受胃肠道中的苛刻条件<sup>[30]</sup>。

### 3 抗性淀粉在发酵乳中的应用概况

功能性食品除了满足基本营养外,还需含有或添加对人体健康有积极影响的成分,或者消除具有消极影响的成分。目前研究最热门的添加成分之一便是 RS<sub>3</sub><sup>[31]</sup>。RS<sub>3</sub> 是通过简单的物理和生物方法制备的,不需要添加额外的化学试剂,绿色、安全和经济。常用方法有高压灭菌、普鲁兰酶脱支和微波加热法。但由于制备方法不同,RS<sub>3</sub> 的形成机理和物化性质也不同,因此对于 RS<sub>3</sub> 对发酵乳品质的影响,就需要从不同来源、不同制备方式具体讨论。

酸奶因其营养价值高、风味独特受到消费者的普遍欢迎。酸奶的品种已由原味淡酸奶向调味酸奶、果粒酸奶和功能性酸奶转化,品种多样化,功能多样化是当今酸奶发展的一种趋势。RS<sub>3</sub> 不仅可以起到增稠剂作用,还可以赋予酸奶保健功能。杨钠<sup>[32]</sup>等将马铃薯抗性淀粉作为乳化剂加入到酸奶中,改善酸奶的色泽、口感和滋味。张嫚<sup>[33]</sup>制作出具有多种生理功能的搅拌型酸奶,以 RS<sub>3</sub> 型抗性淀粉作为增稠剂,口感更加爽滑,酸甜适口。

Shi<sup>[34]</sup>等认为抗性淀粉是一种极其具有研究和使用的功能性物质。增加 RS<sub>3</sub> 的使用量可以显著降低凝乳时间,提高凝乳的结合率。张建强<sup>[35]</sup>选择抗性淀粉代替乳脂肪用于低脂契达干酪的制作,试验组 6 种抗性淀粉样品的生糖指数(GI)范围在 47.35~61.60,说明抗性淀粉可以显著降低热量的摄入。当 RS<sub>2</sub> 与 RS<sub>3</sub> 共同存在时,可以降低干酪 56%~63% 的脂肪含量,明显提高干酪得率,同时很好的改善低脂契达干酪在成熟前、中、后期的质地缺陷。添加的抗性淀粉对低脂契达干酪中 NSLAB(非发酵剂乳酸菌,生长于很多成熟干酪的内部,主要有嗜温性乳酸菌组成)有增殖作用,抗性淀粉在低脂干酪中具有类似益生元的作用。

为降低肥胖、动脉粥样硬化、冠心病和高血压的发病风险,低脂奶酪的需求量日益增加<sup>[36]</sup>。

但是去除或减少脂肪会对奶酪的风味和质地产生不利影响<sup>[37]</sup>。Forough<sup>[38]</sup>等在菲达奶酪中添加菊粉与抗性淀粉充当乳化剂与增稠剂,增加低脂奶酪中的水分含量,无需改动奶酪的生产工艺,就可以解决低脂对菲达奶酪风味和质地的影响。试验结果显示,在奶酪贮藏过程中,添加抗性淀粉的奶酪酸度、乳酸菌数量均高于未添加组。李凌志<sup>[39]</sup>探究豌豆淀粉作为脂肪代替物对 Cheddar 干酪凝乳特性及品质的影响,加工后含有豌豆淀粉的天然干酪中会存在大量 RS<sub>3</sub> 抗性淀粉,保健功能突出。

## 4 抗性淀粉对发酵乳品质影响

### 4.1 RS<sub>3</sub> 对发酵乳活菌数的影响

微生物和宿主的动态平衡被称为微生态平衡。微生态平衡如果被打破便可能引起某些疾病,如炎症性肠病或结肠癌<sup>[40]</sup>。我们的饮食会对肠道菌群的组成和功能产生重大影响,从而影响我们的健康状况<sup>[41]</sup>。酸奶是最常见的发酵乳制品,在酸奶中添加益生菌可以改善酸奶的功能性。抗性淀粉对发酵乳中活菌数的影响,主要根据发酵乳中的成分比例进行划分。当益生菌数量达到一定值时,才能够发挥调节作用,这就要对发酵乳道的原料配比、发酵时间,储藏时间进行控制。抗性淀粉对双歧杆菌、嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌等益生菌有显著的增殖和保护作用。Waldemar<sup>[42]</sup>在酸奶中添加菊粉与抗性淀粉,4 °C 储藏三周后,酸奶中的乳酸菌数量为 10<sup>6</sup>~10<sup>9</sup> CFU/g,满足益生菌在肠道内定植的条件。Mirzaei<sup>[43]</sup>等利用抗性淀粉与海藻酸钙制作包材,对益生菌进行微胶囊化处理添加到酸奶中,在酸奶储藏期内很好的保持了益生菌的存活率。

不同方法制备的 RS<sub>3</sub> 微观结构有所不同,加入酸奶中起到的效果也会有所不同。Jia<sup>[44]</sup>采用高压法、微波加热法和脱支法制备玉米 RS<sub>3</sub>,并考察对应三种玉米 RS<sub>3</sub> (ARS<sub>3</sub>、DRS<sub>3</sub>、MRS<sub>3</sub>) 对酸奶乳酸菌活菌数量的影响。添加 RS<sub>3</sub> 的酸奶样品在发酵结束(4 h)时活菌数较对照组高( $P \leq 0.05$ ),可能是 RS<sub>3</sub> 作为益生元刺激了乳酸菌的增殖,或 RS<sub>3</sub> 充当了优质碳源促进乳酸菌增殖。

Zeng<sup>[45]</sup>等认为结构疏松、表面粗糙的抗性淀粉更易刺激益生菌的生长, DRS<sub>3</sub> 由于微波传热的迅速, 淀粉过度降解, 导致 DRS<sub>3</sub> 颗粒呈现鳞片状, 颗粒较 ARS<sub>3</sub> 的小。MRS<sub>3</sub> 由于酶解程序的影响, 表面粗糙。ARS<sub>3</sub> 是由直链淀粉分子链相互作用并折叠形成致密结构, 很难被乳酸菌利用。因此, 与对照组相比, DRS<sub>3</sub> 和 MRS<sub>3</sub> 的乳酸菌活菌数明显增加 ( $P \leq 0.05$ ); 而 ARS<sub>3</sub> 也可以提高酸奶中的乳酸菌活菌数, 但与对照组相比并无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

#### 4.2 RS<sub>3</sub> 对发酵乳质构特性的影响

益生菌发酵乳市场规模的不断扩大, 促进了发酵乳产品的创新研发。许多研究表明, RS<sub>3</sub> 对发酵乳质构的改善具有十分重要的作用, 可有效改善酸奶生产、贮藏时乳清析出的状况, 改良发酵乳的口感、品质与风味。王兆龙<sup>[46]</sup>在酸奶制作过程中添加玉米 RS<sub>3</sub>, 利用核磁共振技术研究酸奶生产、贮藏过程中酸度、水分、风味的变化。发现抗性淀粉不仅赋予酸奶多种功能特性, 而且使其口感更加清新细腻。Mwizerwa<sup>[47]</sup>研究添加不同质量比木薯 RS<sub>3</sub> 对酸奶品质的影响, 发现其黏度变化有显著性差异 ( $P \leq 0.05$ )。在贮藏期 (21 d) 内对酸奶的表观黏度也有显著影响 ( $P \leq 0.05$ ), 添加 RS<sub>3</sub> 的酸奶样品 pH 值均有所下降, pH 值在第七天急剧下降, 此后缓慢下降。第 21 d 各处理样品的 pH 值 (4.06~4.09) 无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 但均显著高于对照组 (3.95)。RS<sub>3</sub> 用量与酸奶的表观黏度呈正相关, 酸奶在贮藏过程中, 黏度增加是由于蛋白质的重新排列和酪蛋白胶束与 RS<sub>3</sub> 的相互作用。总固形物是决定酸奶凝胶稳定性的最重要因素, 提高 RS<sub>3</sub> 用量能够抵抗酸奶的快速降解, 防止质地变糙和乳清析出, 这与 Muhammad<sup>[48]</sup>的研究相印证。Sajilata<sup>[49]</sup>报道抗性淀粉的保水性可以改善食品质构特性, 酸奶质地对提高风味物质的保留具有重要意义。Mwizerwa 制备的酸奶硬度值为 0.14 N, 但低于其他研究的 3.89 N, 这其中的差异可能与淀粉来源或 RS<sub>3</sub> 制备方法差异有关。Mwizerwa 的研究表明即使在不适用任何稳定剂的情况下, 用 RS<sub>3</sub> 生产被消费者接受的酸奶是有可能的。

食品流变学以弹性力学和流体力学为基础, 主要应用线性粘性理论。了解食品的流变特性对于质量控制、加工和选择合适的设备非常重要<sup>[50]</sup>。抗性淀粉具有很好的水结合能力和增稠作用, 可以控制食品基质的流变行为<sup>[51]</sup>。Rahil<sup>[52]</sup>等利用抗性淀粉研发大豆冷冻酸奶, 产品结合了冰淇淋的物理特性和酸奶的感官特性。研究结果表明, 添加抗性淀粉和  $\beta$ -葡聚糖对冷冻大豆酸奶的流变特性具有积极影响, 可以作为其质构改良剂。何君<sup>[53]</sup>从弹性指数、宏观黏度指数和固液平衡的变化测定玉米 RS<sub>3</sub> 在酸奶凝胶形成过程中的作用, 并进行扫描电镜观察, 探究其微观结构。当样品到达凝胶点时, 添加 RS<sub>3</sub> 的酸奶具有较其他样品高的弹性指数和宏观黏度指数, 并在最后酪蛋白胶束构成稳定的网状结构时, 含有抗性淀粉的酸奶比蔗糖样和空白样有更高的弹性模量和损耗模量。由于 RS<sub>2</sub> 和 RS<sub>3</sub> 结构上的差异, 添加 RS<sub>3</sub> 的酸奶凝固效果更好, 结构更加紧密。通过扫描电镜观察到 RS<sub>3</sub> 中蛋白胶束较其他样品胶束更大, 在凝胶体系中呈嵌入结构, 酪蛋白胶束和其他胶体颗粒呈碎屑状固定其中, 表明 RS<sub>3</sub> 更加有利于酪蛋白的聚集。由于 RS<sub>3</sub> 这一结构特点, 在酸奶发酵过程中可以保护益生菌的同时, 提高体系黏度, 更好的控制贮藏期酸度变化, 有利于强化益生菌的功能。虽然大量的研究证明 RS<sub>3</sub> 能够丰富发酵乳的营养价值, 改良质构, 但是不同类型、不同来源的抗性淀粉对发酵乳品质的影响需进一步研究探索。

#### 5 含抗性淀粉发酵乳的益生评价

含抗性淀粉益生菌发酵乳对人体肠道菌群直接或间接作用, 是其益生性评价的重要指标。抗性淀粉保护益生菌免受不良影响<sup>[54]</sup>, 作为结肠微生物发酵的底物, 促进益生菌的生长、增强其活性<sup>[55]</sup>, 同时可以与其他膳食纤维相互作用, 发挥益生元效应<sup>[56-57]</sup>, 间接的调节人体肠道菌群, 防止肠道疾病的发生, 保障人体健康。大量动物 (大鼠、小鼠、猪) 试验结果显示, 抗性淀粉可以增加乳酸杆菌、双歧杆菌、布氏瘤胃球菌和肠球菌属等菌种丰度<sup>[58-61]</sup>。不同类型的抗性淀粉能够改变肠道微生物群落的组成<sup>[62]</sup>, 如 RS<sub>2</sub>

促进布氏瘤胃球菌和直肠真杆菌增殖, 增加粪便中丁酸盐丰度<sup>[63]</sup>。RS<sub>3</sub> 调节罗斯氏杆菌和溴瘤胃球菌菌群比例来增加丁酸盐丰度<sup>[64]</sup>。莲子 RS<sub>3</sub> 促进长双歧杆菌和保加利亚乳杆菌产生乳酸, 降低结肠内 pH, 从而抑制病原菌的增殖和转移<sup>[65]</sup>。RS<sub>4</sub> 增殖拟细杆菌和青春双歧杆菌, 改善脂质代谢紊乱<sup>[66]</sup>。Martinez<sup>[67]</sup> 的人体试验, 评估不同类型抗性淀粉对肠道菌群的群落结构和种群动态的影响。研究结果显示, 补充 RS<sub>4</sub> 三周后能显著增加粪便群落中放线菌和拟杆菌的丰度, 降低厚壁菌门的丰度, 表明抗性淀粉化学结构决定结肠菌群的可能性。

抗性淀粉亦可以直接作用于肠道菌群, 影响其种类与数量。人体肠道菌群含有数十亿活细菌, 在每克结肠内容物中, 约含细菌 1 000 亿个, 整个肠道中的细菌种类超过 1 000 种, 总量高达 100 万亿个, 是人体细胞数量的 10 倍, 并且时刻处于动态平衡中<sup>[68]</sup>。饮食是保障肠道菌群微生态平衡, 正常发挥群落功能的关键因素。张亚楠<sup>[69]</sup> 等采用菊粉、RS<sub>3</sub> 及其复合物对小鼠进行饮食干预试验, 结果表明, 菊粉和 RS<sub>3</sub> 通过改变肠道菌群结构, 从而促进脂质代谢, 降低体重。Koay<sup>[70]</sup> 等发现小鼠摄食 RS<sub>3</sub> 能有效促进肠道菌群新陈代谢, 增加胆汁酸、三甲胺-N-氧化物及三羧酸循环中间产物等。胆汁酸在肠道中有抗菌作用、抑制肠道炎症, 可以通过乳化作用增加脂肪酶与脂肪的接触, 促进人体脂类物质的消化吸收<sup>[71]</sup>。Zeng<sup>[72]</sup> 发现由于抗性淀粉在结肠内发酵后产生短链脂肪酸, 降低结肠内 pH, 有利于镁、钙等转化成离子, 增加矿物质的生物利用率。目前, 关于含抗性淀粉食品的益生评价相对较少, 尤其是不同来源、不同类型抗性淀粉对肠道菌群的调控方面的影响, 仍需要进一步研究。

## 6 结论与展望

随着生活水平的提高, 人们对食品营养与身体健康的关系理解不断加深, 推动了新产品的开发, 特别是功能性食品的开发。发酵乳制品一直被认为是益生菌和益生元的最流行载体, 在益生菌发酵乳中加入抗性淀粉既可以起到益生元的益

生功能, 又可以起到稳定剂的作用, 提高了产品品质。尽管如此, 将抗性淀粉应用于发酵乳产品市场化仍面临着若干挑战。在未来几年中, 研究领域可能包括以下方面: 1) 对功能性发酵乳进行标准化; 2) 设计更合理的临床研究, 明确抗性淀粉结构特性对肠道菌群调节功能的分子机制; 3) 充分发挥抗性淀粉特性研制合生元, 保持和增强益生菌在货架期和肠道内生存能力; 4) 利用适当的技术和最佳的加工条件来生产满足市场需求的优质产品。总结起来, 我国拥有丰富的抗性淀粉资源, 需广度与深度同时研发, 在开发功能性发酵乳时也需充分考虑消费者的接受度和相关法律政策的允许度。

## 参考文献:

- [1] LANDON S, COLYER C, SALMAN H. The resistant starch report[J]. Retrieved from Food Australia Supplement. Australia: Goodman Fielder Ltd and National, 2012.
- [2] 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, ZHENG 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.
- [3] LIU R, XU G. Effects of resistant starch on colonic preneoplastic aberrant crypt foci in rats[J]. Food & Chemical Toxicology An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 2008, 46(8): 2672-2679.
- [4] SHIMADA M, MOCHIZUKI K, GODA T. Dietary resistant starch reduces levels of glucose-dependent insulinotropic polypeptide mRNA along the jejunum-ileum in both normal and type 2 diabetic rats[J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 2008, 72(8): 2206-2209.
- [5] HASHIMOTO N, NAKAMURA Y, NODA T, et al. Effects of feeding potato pulp on cholesterol metabolism and its association with cecal conditions in rats[J]. Plant Foods Hum Nutr, 2011, 66(4): 401-407.
- [6] PATINDOL J A, GURAYA H S, CHAMPAGNE E T, et al. Nutritionally important starch fractions of rice cultivars grown in southern United States[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(5): H137-H144.
- [7] RECIFE A, MENEGUIN A B, CURY B, et al. Evaluation of retrograded starch as excipient for controlled release matrix tablets[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2017: 83-94.
- [8] 娄朋举, 阚洪因, 尚敏, 等. 青香蕉粉中抗性淀粉的稳定性及消化性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 28-35.

- LOU P G, KAN H G, SHANG M, et al. Stability and digestibility of resistant starch in banana powder[J]. *Food research and development*, 2022,43(2): 28-35.
- [9] BINDELS L B, DELZENNE N M, CANI P D, et al. Towards a more comprehensive concept for prebiotics[J]. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*, 2015, 12(5): 303-310.
- [10] CAPUANO E. The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determines its physiological effect[J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2017, 57(16): 3543-3564.
- [11] SANDERS M E, MERENSTEIN D J, REID G, et al. Probiotics and prebiotics in intestinal health and disease: from biology to the clinic[J]. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*, 2019, 16(10): 605-616.
- [12] GIBSON G R, HUTKINS R, SANDERS M E, et al. Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics[J]. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*, 2017, 14(8): 491-502.
- [13] 杨子姗, 郑锦玲, 徐率, 等. 抗性淀粉与人类健康[J]. *现代食品*, 2022, 28(10): 132-136.
- YANG Z S, ZHENG J L, XU L, et al. Resistant starch and human health[J]. *Modern food*, 2022, 28(10): 132-136.
- [14] REZENDE E S V, LIMA G C, NAVES M M V. Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposal classification by prebiotic categories[J]. *Nutrition*, 2021,89: 111217.
- [15] ZAMAN S A, SARBINI S R. The potential of resistant starch as a prebiotic[J]. *Critical reviews in biotechnology*, 2016, 36(3): 578-584.
- [16] RAIGOND P, RAIGOND B. Resistant starch in food: a review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(10): 1968-1978.
- [17] 肖兵. 抗性淀粉对糖尿病小鼠血糖和短链脂肪酸的影响及代餐产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- XIAO B. Effects of resistant starch on blood glucose and short chain fatty acids in diabetic mice and development of food substitute products[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [18] XU J, MA Z, LI X, et al. A more pronounced effect of type III resistant starch vs. type II resistant starch on ameliorating hyperlipidemia in high fat diet-fed mice is associated with its supramolecular structural characteristics[J]. *Food & Function*, 2020, 11(3): 1982-1995.
- [19] 杨娜, 王金荣, 王朋, 等. 抗性淀粉对动物生长性能和肠道健康的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(20): 114-117.
- YANG N, WANG J R, WANG P, et al. Effects of resistant starch on animal growth performance and intestinal health[J]. *Feed study*, 2021,44 (20): 114-117
- [20] 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):6
- HU Z Z, HAO Z S, MENG Y, et al. Research progress on the preparation, efficacy and application of resistant starch[J]. *China Food and Nutrition*, 2021, 27(1): 6.
- [21] ZHOU Y, ZHAO S, JIANG Y, et al. Regulatory function of buckwheat in resistant starch supplementation on lipid profile and gut microbiota in mice fed with a high at diet[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(9): 2674-2681.
- [22] REZAC S, KOK C R, HEERMANN M, et al. Fermented foods as a dietary source of live organisms[J]. *Frontiers in microbiology*, 2018, 9: 1785.
- [23] ASHAOLU T J. A review on selection of fermentative microorganisms for functional foods and beverages: the production and future perspectives[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(8): 2511-2519.
- [24] BELTRÁN-BARRIENTOS L M, HERNÁNDEZ-MENDOZA A, TORRES-LLANEZ M J, et al. Invited review: Fermented milk as antihypertensive functional food[J]. *Journal of dairy science*, 2016, 99(6): 4099-4110.
- [25] MOHAMMADI R, YOUSEFI M, SARLAK Z, et al. Influence of commercial culture composition and cow milk to soy milk ratio on the biochemical, microbiological, and sensory characteristics of a probiotic fermented composite drink[J]. *Food science and biotechnology*, 2017, 26(3): 749-757.
- [26] 屈青云, 许伟, 胡源, 等. 抗性淀粉饮食模式下 L-茶氨酸对大鼠肠道免疫功能的调节作用[J]. *食品与机械*, 2021, 37(12): 32-39+51.
- QU Q Y, XU W, HU Y, et al. The regulatory effect of L-theanine on intestinal immune function in rats under resistant starch diet[J]. *Food and machinery*, 2021, 37 (12): 32-39+51.
- [27] KHORSHIDIAN N, YOUSEFI M, SHADNOUSH M, et al. An overview of  $\beta$ -Glucan functionality in dairy products[J]. *Current Nutrition & Food Science*, 2018, 14(4): 280-292.
- [28] YOUSEFI M, SHARIATIFAR N, TAJABADI EBRAHIMI M, et al. In vitro removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by lactic acid bacteria[J]. *Journal of applied microbiology*, 2019, 126(3): 954-964.
- [29] 成学佳. 益生菌及其乳制品与人体健康[J]. *中外食品工业*, 2021, (6): 131.
- CHENG X J. A good student. Probiotics and their dairy products and human health[J]. *Sino-Foreign Food Industry*, 2021, (6): 131.
- [30] RANADHEERA C S, VIDANARACHCHI J K, ROCHA R S, et al. Probiotic delivery through fermentation: Dairy vs. non-dairy beverages[J]. *Fermentation*, 2017, 3(4): 67.
- [31] 徐茂森, 张涛, 孙亚丽, 等. 功能水稻研究领域热点之一——高抗性淀粉水稻[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 23-30.
- XU M S, ZHANG T, SUN Y L, et al. One of the research hotspots in functional rice - high resistant starch rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(11): 23-30.
- [32] 杨纳, 李周勇, 周霞, 等. 马铃薯抗性淀粉在酸奶中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(10): 5.
- YANG N, LI Z Y, ZHOU X, et al. Application of potato resistant starch in yogurt[J]. *Food Research and Development*, 2016,

- 37(10): 5.
- [33] 张嫚. RS3 抗性淀粉对酸奶品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2010, 1(5): 417-419.  
ZHANG M. Effect of RS3 resistant starch on the quality of yogurt[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010, 1(5): 417-419.
- [34] SHI Y C, MANINGAT C C. Resistant starch: Sources, applications and health benefits[M]. West Sussex: IFT, 2013.
- [35] 张建强. 抗性淀粉替代乳脂对低脂干酪功能性的影响[D]. 东北农业大学, 2020.  
ZHANG J Q. Effect of resistant starch replacing milk fat on the functionality of low-fat cheese[D]. Northeast Agricultural University, 2020.
- [36] 迟涛, 王欢, 姜楠, 等. 聚合乳清蛋白对低脂切达干酪理化性质的影响[J]. 乳业科学与技术, 2020, 43(2): 7.  
CHI T, WANG H, JIANG N, et al. Effect of polymerized whey protein on physicochemical properties of low-fat cheddar cheese[J]. Dairy Science and Technology, 2020, 43(2): 7.
- [37] 唐立伟, 周昱婧, 周芷寒, 等. 脂肪替代物在奶酪中的应用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2020(9): 168-171.  
TANG L W, ZHOU Y J, ZHOU Z H, et al. Research progress on the application of fat substitutes in cheese[J]. Food Safety Review, 2020(9): 168-171.
- [38] TABIBLOGHMANY F S, HOSSEINI E, HOJIATOLESLAMY M, et al. Influence of resistant starch and exopolysaccharide-producing streptococcus thermophilus on viability of lactic acid bacteria in low fat UF feta cheese during ripening[J]. Annual Research & Review in Biology, 2014, 4(24): 4413-4425.
- [39] 李凌志. 豌豆淀粉作为脂肪替代物对 Cheddar 干酪凝乳特性及品质的影响[D]. 东北农业大学, 2018.  
LI L Z. Effect of pea starch as fat substitute on curd properties and quality of Cheddar cheese[D]. Northeast Agricultural University, 2018.
- [40] 马玲玲, 冀建斌. 炎症性肠病肠道微生态新进展[J]. 医学理论论, 2022, 35(9): 1472-1474+1481.  
MA L L, JI J B. New advances in intestinal microecology of inflammatory bowel disease[J]. Medical Theory Practice, 2022, 35(9): 1472-1474+1481.
- [41] 刘翼翔, 马玉, 李东慧, 等. 膳食结构和成分通过调控肠道菌群影响食物过敏的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 282-290.  
LIU Y X, MA Y, LI D H, et al. Advances in the study of dietary structure and composition affecting food allergy by regulating gut microbiota[J]. Food Science, 2021, 42(17): 282-290.
- [42] GUSTAW W, KORDOWSKA-WIATER M, KOZIOL J. The influence of selected prebiotics on the growth of lactic acid bacteria for bio-yoghurt production[J]. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria, 2011, 10(4): 455-466.
- [43] MIRZAEI H, POURJAFAR H, HOMAYOUNI A. Effect of calcium alginate and resistant starch microencapsulation on the survival rate of Lactobacillus acidophilus La5 and sensory properties in Iranian white brined cheese[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1966-1970.
- [44] JIA S Y, ZHAO H B, TAO H T, et al. Influence of corn resistant starches type III on the rheology, structure, and viable counts of set yogurt[J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 203: 10-18.
- [45] ZENG H L, ZHENG Y X, LIN Y, 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.
- [46] 王兆龙. 核磁共振技术在抗性淀粉酸牛奶中的应用[D]. 南昌大学, 2012.  
WANG Z L. Application of nuclear magnetic resonance technology in resistant starch yogurt[D]. Nanchang University, 2012.
- [47] MWIZERWA H, OOKO A G, OKOTH M, et al. Effect of resistant cassava starch on quality parameters and sensory attributes of yoghurt[J]. Current Research in Nutrition and Food Science Journal, 2017, 5(3): 353-367.
- [48] MUHAMMAD B F, ABUBAKAR M M, ADEGBOLA T A. Effect of period and condition of storage on properties of yoghurt produced from cow milk and soymilk materials[J]. Research Journal of Dairy Sciences, 2009, 3(2): 18-24.
- [49] 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.
- [50] 施冬. 从药品生产质量控制看选择制药设备的重要性[J]. 科技创新与应用, 2019(26): 184-185.  
SHI D. The importance of selecting pharmaceutical equipment from the perspective of drug production quality control[J]. Technological innovation and application, 2019(26): 184-185.
- [51] JIANG F, DU C W, JIANG W Q, et al. The preparation, formation, fermentability, and applications of resistant starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, (150): 1155-1161.
- [52] REZAEI R, KHOMEIRI M, KASHANINEJAD M, et al. Steady and dynamic rheological behaviour of frozen soy yogurt mix affected by resistant starch and  $\beta$ -glucan[J]. International Journal of Food Properties, 2018: 1-8.
- [53] HE J, HAN Y M, 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.
- [54] MW A, XC A, LZ A, et al. Prebiotic effects of resistant starch nanoparticles on growth and proliferation of the probiotic Lactiplantibacillus plantarum subsp. plantarum-ScienceDirect[J]. LWT, 2022, (154): 112572.
- [55] FELINA P Y T, EDUARDO B, RUURDT Z. Resistant starch: Implications of dietary inclusion on gut health and growth in pigs: a review[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2022, 13(3): 613-627.

- [56] 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 Y C, KONG H. Research progress on biological activity of resistant starch[J]. Parenteral and enteral nutrition, 2018, 25(5): 313-317.
- [57] 张语涵, 徐同成, 刘丽娜, 等. 抗性淀粉与肠道微生物的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(11): 60-63.  
ZHANG Y H, XU T C, LIU L N, et al. Research progress on resistant starch and intestinal microbes[J]. China Food and Nutrition, 2019, 25(11): 60-63.
- [58] LEI S, LIU L, DING L, 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.
- [59] SHANG W, SI X, ZHOU Z, et al. Characterization of fecal fat composition and gut derived fecal microbiota in high-fat diet fed rats following intervention with chito-oligosaccharide and resistant starch complexes[J]. Food & Function, 2017, 8(12): 4374-4383.
- [60] LI T, TENG H, AN F, 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.
- [61] BIE N N, DUAN S Q, MENG M. Regulatory effect of non-starch polysaccharides from purple sweet potato on intestinal microbiota of mice with antibiotic-associated diarrhea[J]. Food & Function, 2021, 12: 5563-5575.
- [62] JIANG F, DU C, JIANG W, et al. The preparation, formation, fermentability, and applications of resistant starch[J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 150: 1155-1161.
- [63] METZLER-ZEBELI B U, SCHMITZ-ESSER S, MANN E, et al. Adaptation of the cecal bacterial microbiome of growing pigs in response to resistant starch type 4[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, 81(24): 8489-8499.
- [64] ZENG H, ZHENG Y, LIN Y, 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.
- [65] JUNG D H, KIM G Y, KIM I Y, et al. *Bifidobacterium adolescentis* P2P3, a human gut bacterium having strong non-gelatinized resistant starch-degrading activity[J]. Journal of microbiology and biotechnology, 2019, 29(12): 1904-1915.
- [66] TSAI Y L, LIN T L, CHANG C J, et al. Probiotics, prebiotics and amelioration of diseases[J]. Journal of biomedical science, 2019, 26(1): 1-8.
- [67] MARTINEZ I, KIM J, DUFFY P R, et al. Resistant starches types 2 and 4 have differential effects on the composition of the fecal microbiota in human subjects[J]. PloS one, 2010, 5(11): e15046.
- [68] 杨秉辉. 肠菌维系人体健康[J]. 康复, 2019(7):1.  
YANG B H. Enteric bacteria maintain human health[J]. Rehabilitation, 2019(7): 1.
- [69] 张亚楠, 毛传武, 熊成龙, 等. 菊粉、抗性淀粉 RS3 及其复合物对小鼠脂肪代谢及肠道菌群的影响[J/OL]. 上海预防医学: 1-8[2021-12-15].  
ZHANG Y A, MAO C W, XIONG C L, et al. Effects of inulin, resistant starch rs3 and their complexes on lipid metabolism and intestinal flora in mice[J/OL]. Shanghai Preventive Medicine, 1-8 [2021-12-15].
- [70] KOAY Y C, WALI J A, LUK A W S, et al. Ingestion of resistant starch by mice markedly increases microbiome-derived metabolites[J]. The FASEB Journal, 2019, 33(7): 8033-8042.
- [71] 谭伟豪, 王丽娜. 胆汁酸代谢与肠道微生物互作研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(4): 129-132.  
TAN W H, WANG L N. The interaction between bile acid metabolism and intestinal microorganisms[J]. Feed research, 2021, 44(4): 129-132.
- [72] ZENG H, HUANG C, LIN S, 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.