

抗性淀粉的消化特性及其在食品中的应用

米红波¹, 邓婷月^{1,2}, 李 毅¹, 陈敬鑫^{*1}, 李学鹏¹, 仪淑敏¹, 励建荣¹

(1. 渤海大学 食品科学与工程学院/国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心/生鲜农产品贮藏加工与安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013; 2. 大连工业大学 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁 大连 116034)

摘要: 抗性淀粉(Resistant starch, RS) 作为一种新型膳食纤维, 不能被人体胃和小肠消化吸收, 但可进入结肠中被肠道菌群发酵利用, 进而发挥其降血糖、降血脂、预防心血管疾病和结肠癌等多种生理功效。这些特性使 RS 用于预防血脂异常和治疗胰岛素分泌相关的疾病, 以及开发减肥食品, 使通过饮食疗法来治疗 2 型糖尿病和冠心病成为可能。然而, 在大多数天然食品中 RS 的含量甚微, 难以达到控制血糖平衡的功效。因此, 如何制备 RS 并将其应用到食品中已成为国内外食品行业的研究热点。作者综述了 5 类 RS 及其制备方法和消化特性, 阐述了 RS 在谷物蒸煮、烘烤、油炸和功能性食品中的应用现状, 并提出了 RS 的未来研究方向, 以期对 RS 的深入研究及富含 RS 食品的开发提供参考。

关键词: 抗性淀粉; 制备方法; 消化性; 食品; 应用

中图分类号: TS 231 文章编号: 1673-1689(2021)09-0009-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.09.002

Study on Digestibility of Resistant Starch and Its Applications in Food

MI Hongbo¹, DENG Tingyue^{1,2}, LI Yi¹, CHEN Jingxin^{*1}, LI Xuepeng¹, YI Shumin¹, LI Jianrong¹

(1. College of Food Science and Technology / National R&D Branch Center of Surimi and Surimi Products Processing/ National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Resistant starch (RS), as a new type of dietary fiber, cannot be digested and absorbed by human stomach and small intestine, but it can be fermented and utilized by intestinal flora in colon and has various physiological effects such as reducing blood sugar and fat, preventing cardiovascular disease and colon cancer. These characteristics make it possible for RS to prevent diseases related to dyslipidemia and insulin secretion, and to develop weight loss foods and dietary therapies to treat type 2 diabetes and coronary heart disease. However, the content of RS in most natural foods is too low to achieve the effect of controlling blood sugar balance. Therefore, how to prepare RS and apply it to food has become a research hotspot in the domestic and foreign food industry. The preparation methods and digestive characteristics of five types of RS were reviewed, and the current application

收稿日期: 2020-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31701629, 31972107); 国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFD0400603); 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC1807133, XLYC1907040)。

作者简介: 米红波(1986—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事水产品贮藏与加工方面研究。E-mail: mihongbo1001@163.com

* 通信作者: 陈敬鑫(1985—), 男, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事农产品贮藏与加工方面研究。E-mail: cht860625@163.com

of RS in grain cooking, baking, frying and functional foods was introduced. In addition, the future research directions of RS were summarized to provide references for in-depth research of RS and development of RS-rich foods.

Keywords: resistant starch, preparation method, digestibility, food, application

抗性淀粉 (Resistant starch, RS) 一词最早是由 Englyst 及其同事于 1982 年在英国剑桥大学的医疗研究委员会邓恩临床营养中心提出的^[1]。RS 是指不能被人体小肠降解和吸收,但能在结肠中被发酵利用的淀粉或淀粉类食品的总称^[2]。根据来源、结构、消化特性和应用的不同,RS 可分为 5 类:RS1(物理包埋淀粉)、RS2(抗性淀粉颗粒)、RS3(老化回生淀粉)、RS4(化学改性淀粉)、RS5(淀粉-脂质复合物)。

随着“三高”人群越来越多,且逐渐趋于年轻化,而通过饮食控制是人们乐于接受和追求的,开发控制消化的产品也趋于白热化。RS 作为一种新型膳食纤维,可降低健康成年人的餐后葡萄糖和胰岛素水平^[3],对降低胆固醇、稳定血糖、控制体质量、抑制脂肪的吸收囤积具有正面效益。同时,RS 可被结肠中的微生物菌群发酵产生短链脂肪酸^[4],降低肠道内的 pH,调节人体肠道菌群和免疫功能,对人体健康具有极大的益处。目前,人们已经从分子结构、制备方法、形成机理及消化特性等方面对 RS 进行了广泛研究,并越来越多地将其作为添加剂应用到食品工业中。作者主要介绍了 5 类 RS 的制备方法、消化特性,及其在谷物蒸煮、烘烤、油炸和功能性食品中的应用,为抗性淀粉的深入研究和开发提供参考和依据。

1 抗性淀粉的分类及制备方法

1.1 RS1

RS1 为物理包埋淀粉,是通过细胞壁和蛋白质基质形成的物理性屏障作用,将淀粉颗粒全部或部分截留在碾磨的谷物或种子中,使消化酶无法与其接触形成的淀粉。与其他类型 RS 相比,RS1 对消化的抵抗力较弱^[5]。当对整粒或粗磨的种子进行烹饪时,豆类种子的细胞壁和谷物中的蛋白质会阻止水分渗入基质中,导致淀粉不具有足够的水分使其溶胀和胶凝化,淀粉分子不易被暴露出来;另外,肠道中缺乏细胞壁降解酶,使淀粉不易被酶水解^[6]。RS1 具有热稳定性,但其含量在咀嚼及加工过程中会受

到影响^[7]。为了提高 RS1 含量,应加强物理包埋且避免磨细,但目前很少有研究报道提高 RS1 含量的加工方法。

1.2 RS2

RS2 是指某些天然的淀粉颗粒,如青香蕉、生马铃薯淀粉和高直链玉米淀粉,因淀粉颗粒特殊的晶体结构和构象而具有天然酶抗性,在小肠中几乎不被消化。大多数 RS2 具有 B 型结晶结构、少数具有 C 型结晶结构,其结构的完整性和高密度性限制了消化酶和各种淀粉酶的可及性^[8]。对于大多数 RS2,热稳定性较差,高水分含量和正常烹饪温度会使其淀粉颗粒的结构被破坏,从而可能导致淀粉糊化和 B 型或 C 型结晶结构的丧失而变得易于消化^[9]。高直链玉米淀粉是一种特殊的 RS2,其在大多数加工过程中性质稳定,对消化酶具有抗性^[10]。

通常淀粉颗粒大小、表面特征、直链淀粉含量以及致密填充的颗粒结构都会影响 RS2 的含量,在制备 RS2 过程中需要注意这些因素。例如品种为 Basmati 370 和 Koshihikari 的水稻抗性淀粉颗粒的主要来源均为直链淀粉^[11],通常含有更多直链的淀粉被认为对酶水解更具抵抗力。青香蕉粉中含有大量 RS2,通过挤压蒸煮可提高 RS2 含量^[12]。利用脱支酶解处理制备豌豆抗性淀粉(RS2),其晶型由原来的 C 型变为 B+V 型^[13],而 B 型的淀粉对酶解有更强的抵抗力。

1.3 RS3

RS3 是糊化后的淀粉在冷却过程中由于淀粉链紧密盘绕重新生成新的结晶体,如煮熟后冷却的马铃薯、面包皮和回生的高直链玉米淀粉,因此属于物理变性淀粉。RS3 主要有 B 型、B+V 型、A+V 型的结晶类型。RS3 包括 RS3a(凝沉的支链淀粉)和 RS3b(凝沉的直链淀粉)两部分,而 RS3b 的抗酶解性更强。RS3 具有热稳定性高、持水性低的性质。

RS3 的制备方法有热处理法、脱支处理法、微波法、超声波法等。RS3 的制备一般由两种或两种以上的方法相结合,其得到的 RS3 相对来说含量更高、

效果更好。热处理法属于物理法,是将一定比例的淀粉和水混合成溶液,通过加热糊化,冷却回生,最后干燥粉碎得到 RS3^[14]。Nani 等^[15]采用蒸压-冷却循环的方法制备 RS3,于 121 °C 下高压灭菌 20 min,RS3 含量明显提高,微晶和双螺旋结构含量有所增加,预期血糖生成指数降低。脱支处理是利用酶或酸水解淀粉分子,使其分解成更多小分子的直链淀粉。使用最多的是普鲁兰酶,它能够专一性切开支链淀粉分支点中的 α -1,6 糖苷键,形成直链淀粉,再通过冷却回生重新缔合成新的结晶结构,利于 RS 的形成。通过酸稀化、脱支和重结晶制备豌豆和普通玉米 RS3,用前两种方法制备的玉米 RS3 相比豌豆 RS3 的结晶度更高,解离温度更高,前者具有结构更紧凑的双螺旋微晶,酶消化率较低,且两种 RS3 显示出比原天然淀粉更高的酶抗性^[16]。利用微波增韧和低温老化的方法制备马铃薯 RS,RS 的质量分数由 11.54% 提高至 27.09%^[17]。Masatcioglu 等用挤压蒸煮法对高直链玉米淀粉中 RS 形成进行研究,当物料含水质量分数为 60% 时 RS 含量最高,样品中双折射现象的大量消失表明 RS 的增加主要归因于 RS3 的形成^[18]。

1.4 RS4

RS4 主要指通过化学改性后,淀粉分子结构的改变及化学官能团的引入而产生的抗酶解淀粉。RS4 中的大量衍生基团在空间上妨碍了酶与底物形成复合物,使 RS 对酶消化性降低,但淀粉中不含衍生物的区域可以被细菌淀粉酶水解并发酵产生短链脂肪酸^[6]。

常用的制备 RS4 的方法有酯化、乙酰化、醚化和交联作用等。Liu 等应用去支化蜡质玉米淀粉制备柠檬酸酯化的脱支淀粉,并研究改性对 RS 形成的影响,结果表明柠檬酸酯化的脱支淀粉水解速率和消化率最低,柠檬酸酐的引入会导致淀粉分子空间位阻增加,从而延迟了酶在糖苷键内的接触^[19]。通过乙酰化对早稻淀粉进行化学修饰,RS4 含量明显增加^[20]。用烯丙基缩水甘油醚醚化使淀粉改性,醚化后的直链淀粉颗粒结晶度大幅度降低,糊化温度下降,而糊化后峰值黏度、形成黏稠糊状物的能力增加,溶胀力和溶解度指数都随着取代度的增加而增加^[21]。以甘薯淀粉为原料,三偏磷酸钠/三聚磷酸钠为交联剂制备 RS4,当交联剂质量分数为 10%、反应 pH 为 11.5、水分质量分数为 20%、温度为 120 °C

时,制备的交联抗性淀粉质量分数最高达 72.45%^[22]。

1.5 RS5

淀粉与脂质之间发生相互作用,形成的复合物称为 RS5。RS5 的形成过程分为 3 个阶段^[23]:1)直链淀粉和支链淀粉长链部分的螺旋结构内部的水分子与葡萄糖残基形成氢键,从而实现了缠绕结构和螺旋结构之间的转化,螺旋结构内部的水分子被挤出;2)螺旋结构内部的疏水基团与脂质或脂肪酸的碳氢键(具有疏水性)反应;3)形成两种类型的 RS5(I 型复合物和 II 型复合物),且其螺旋结构不易与淀粉酶结合,两种结构的形成取决于脂质的类型和反应条件,II 型复合物的热稳定性强于 I 型复合物,但其形成速度较慢。

通过高压均质工艺,使用莲子淀粉和单硬脂酸甘油酯制备 RS5,结果表明高压均质可降解支链淀粉而减少分子间缠结,从而导致表观黏度和黏弹性下降,改变了淀粉凝胶网络,而且优化了水分分布^[24]。二甲基亚砜是一种具有较大偶极距和高介电常数的油状液体,可破坏淀粉分子的氢键,从而使淀粉溶解,释放直链淀粉分子。将马铃薯淀粉悬浮液(质量分数 10%)与 30 mL 二甲基亚砜混合并在 95 °C 下搅拌 30 min,然后将溶解在无水乙醇中的月桂酸(马铃薯淀粉质量的 2%)添加到淀粉-二甲基亚砜混合物中,将最终混合物在 95 °C 下搅拌 90 min 可得到复合物^[25]。酸碱沉淀法是指首先让淀粉、脂质(或脂肪酸)分别溶于一定浓度的 KOH 溶液中,再加入一定浓度的 HCl 调节体系的 pH,让混合物反应一段时间可得到淀粉-脂质(或淀粉-脂肪酸)复合物^[26]。

2 抗性淀粉的消化特性

在人体内,淀粉的消化主要在口腔、胃、肠 3 个阶段。非 RS 从进入口腔开始就被唾液淀粉酶消化一部分,然后进入胃,再进入小肠被消化吸收。然而,RS 不能在小肠中被消化吸收,但可被结肠中的微生物菌群发酵产生代谢产物而发挥有益的生理功能。从消化特性的不同可以预测淀粉消化后结构、作用的不同。近年来,一般采用斜率对数(Logarithm of slope, LOS)的方法分析淀粉的消化曲线,研究模拟体外消化过程中淀粉的消化速率。

2.1 模拟口腔消化阶段

俞安珍^[27]研究芡实淀粉、增抗芡实淀粉及纯化

后的芡实 RS 的消化特性, 结果表明这 3 类淀粉样品在口腔段的消化率可占总消化率的 50%~60%。芡实淀粉的最终消化水解率为 89.44%, 而芡实 RS 的最终消化水解率在 20% 左右, 说明在口腔阶段芡实 RS 相比芡实淀粉增强了对酶的抗性。

2.2 模拟胃消化阶段

利用盐酸、胃蛋白酶和水配制人工胃液, 板栗 RS3 在人工胃液中消化 4 h, 随消化时间增加消化率显著增加, 但最终消化率仅为 0.253%^[28]。李姗姗等^[29]测定 3 种马铃薯 RS(工业生产 RS、自制 RS 和 RS3) 的消化性质, 在胃液中三者的失重率分别为 3.44%、4.27%、5.56%, 说明人工胃液对 RS 的消化作用不大。木薯、红薯、马铃薯、豌豆和绿豆 RS 在人工胃液中模拟消化 4 h 后, 所有样品的消化率都小于 1%^[30]。人工胃液对 RS 的消化作用主要是由于胃液呈强酸性, 对 RS 会有轻微的水解作用。

2.3 模拟肠消化阶段

主要是利用胰酶模拟肠液进行消化。板栗 RS3 在人工肠液中消化 20~240 min, 消化率为 2.62%~3.90%, 消化率较低^[28]。用胰淀粉酶进行水解研究糯米 RS 在小肠中的消化率, 在前 3 h, RS 的消化产物和平均消化速度都急剧增加; 消化 3 h 后, 由于淀粉分子与淀粉酶之间的结合位点减少, RS 的消化速度降低^[31]。胆汁酸是由胆固醇在肝脏中合成的, 膳食纤维可以通过结合肠道中的胆汁酸来降低血液中胆固醇水平, 从而增加粪便中胆汁酸的排泄。研究表明大米 RS 与胆汁酸的结合能力比天然样品高 11.23%~12.88%^[32]。

目前分阶段单独研究 RS 消化特性的报道较少, 主要集中在建立三段式(口腔-胃-小肠)和两段式(胃-小肠)体外消化模型来研究 RS 在消化道内的消化情况, 通常采用体外模拟淀粉酶水解原淀粉和 RS 的方法, 得到 RS 水解指数、消化水解率、消化速率常数等动力学参数来建立动力学消化模型。Sun 等用两段式消化模型研究酸水解对淀粉-肉豆蔻酸复合物消化率的影响, 随着酸水解时间的增加(0~3 h), RS5 的体外消化率由 16.77% 减少到 5.03%^[33]。Quintero-castano 等用辛烯基琥珀酸酐改性香蕉淀粉, 结果表明生改性淀粉的水解速率比未改性淀粉的水解速率低, 生改性淀粉的 RS 含量比熟改性淀粉的 RS 含量高很多, 水解速率常数与 RS 含量呈负相关^[34]。

综上, RS 的消化率比天然淀粉的消化率要低很多, 并且 RS 预期血糖指数水平均显著低于其相应的天然淀粉。

3 抗性淀粉在食品中的应用

RS 具有粒径小、颜色白、风味淡、口感细腻、持水性低等性质, 与传统膳食纤维(如全谷类、麸皮、水果纤维)相比, RS 作为添加剂不会对食品的质地和口感产生负面影响^[35]。相反, RS 可以改善某些产品的酥脆性和膨胀性, 获得更好的口感、色泽和风味, 延长食品保质期。例如, RS 添加量(质量分数)低于 30% 时, 面包的水分流失较慢, 可以获得良好体积比、气孔均匀、质地柔软且具有功能特性(如降低血糖)的面包^[36]。由于 RS 的流变特性和热稳定性好, 持水性低, 可以作为食品增稠剂使用。与天然淀粉汤液相比, 含 1.0%(质量分数)交联木薯淀粉的汤液表现出最强的凝胶特性和最大的抗剪切性能, 改善了汤的质地和感官品质^[37]。RS 独特的理化性质使产品更容易被消费者接受, 同时可以增加膳食纤维的摄入量, 所以目前的研究目标是以 RS 为原料开发并生产出高质量、低血糖生成指数的产品。

3.1 RS 在谷物蒸煮食品中的应用

谷物蒸煮食品通常包括馒头、面条、米粉等。将 RS 代替普通天然淀粉制得具有特殊功能的面条、馒头, 在不影响产品感官品质的前提下, 有利于减少咀嚼度和增加饱腹感, 降低面条、馒头消化率。如添加 12%(质量分数)桂朝大米淀粉-脂肪酸复合物至大米粉中制作米粉, 米粉的硬度、弹性和咀嚼性得到了明显的改善^[38]。翟文奕制备高 RS 馒头, 有利于小鼠餐后血糖水平的控制^[39]。Raungrusmee 等以大米 RS 为原料, 研制出低血糖指数的无麸质面条, 同时黄原胶的加入改善了 RS 无麸质面条的质地^[40]。

3.2 RS 在焙烤食品中的应用

RS 口感细腻, 持水能力低, 适合充当品质改良剂应用于低水分食品中, 如面包、饼干、蛋糕等。RS 通过与蛋白质结合, 增强了面筋的黏聚力、面团的保气性, 改良后的面团产品更有光泽, 弹性和咀嚼性提高^[41]。在饼干面粉中添加持水性较低的交联小麦淀粉(RS4)可使面团变得更柔软, 制备出高纤维、低血糖生成指数的饼干, 且饼干宽度和厚度值显著提高, 品质得到明显改善^[42]。张伟等制备的银杏 RS 蛋糕具有良好的口感和抗消化功能, 体外水解率在

60 min 时趋于稳定,为 62.87%,显著低于对照组^[43]。利用紫薯 RS 替代小麦粉制作面包,面包中 RS 质量分数比传统小麦面包增加 6.4%,同时紫薯面包中淀粉的消化率降低,这可能是由烘焙后紫薯粉的淀粉颗粒相对完整和紫薯 RS 对消化酶的抑制作用导致的^[44]。

3.3 RS 在油炸调理食品中的应用

RS 具有很好的热稳定性,可作为油炸食品添加剂来减少油炸食物的含油量,提高食物的脆性,从而改善食品的品质。添加 20%(质量分数)磷酸酯双淀粉(RS4)能显著降低油炸调理鸡排的含油量,使鸡排外壳表现出更好的金黄色,形成密实、连续的面糊微结构,改善外壳脆性^[45]。用 20%(质量分数)的 RS3 代替小麦粉包裹鱿鱼圈,油炸后鱿鱼圈的硬度和脆性显著增加,呈现出更好的金黄色^[46]。

3.4 RS 在功能性食品中的应用

以 RS 为原料开发高品质的功能性保健食品具有巨大的应用前景。当前市面上已经存在许多富含 RS 的产品,如高纯度 RS3 复合冲调剂,能够清理肠道毒素,清除过多的血脂、血糖;高纯度的蕉芋 RS3,可抗消化、控制食欲,是健康减肥的产品;RS 糊精压片糖果,具有无糖低热量特性等。He 等研究 RS2(高直链玉米淀粉)和 RS3(物理改性的玉米淀粉)对酸奶品质的影响,含 RS2 的酸奶可诱导凝胶网络结构中保持更多的浆液;含 RS3 的酸奶除了保护益生菌外,还更好地控制了发酵后的酸度,有助于增强益

生菌的功能^[47]。另外,RS 具有优异的挤出性能和成膜性能,可作为食品级微胶囊的包衣材料^[48],通过包裹益生菌食品,从而达到定点控制释放的目的,提高益生菌活性。如利用藻酸盐和 RS 包裹乳链菌肽,与单独藻酸盐配方相比,0.5%(质量分数)RS 的存在会增加包埋率,而 RS 与藻酸盐的共混物包埋延长了贮藏过程中乳链菌肽的释放时间,提高乳链菌肽的活性^[49]。

4 结 语

RS 能够增强机体免疫系统、矿物质的吸收、胆汁酸的排泄,降低餐后血糖水平、胰岛素反应,预防结肠癌、肥胖、高血压、糖尿病等。由于以上生理活性和功能特性,RS 成为当下国内外研究的热点,尤其是前四类 RS 应用于食品较多。而淀粉-脂质或淀粉-脂肪酸复合物在国内的研究尚处于起步阶段,主要集中在制备方法、结构表征方面,尚未在食品工业中得到应用。目前,RS 的研究和应用仍存在许多问题,以下对 RS 的未来研究作几点展望:1)完善 RS 纯化方案和作用机理;2)当前主要集中在 RS 体外消化的研究,体内消化实验在合适的条件下应予以增加;3)RS 的消化率和血糖生成指数关系的研究较多,而 RS 的摄入量与多种人体代谢指标间的联系有待进一步研究;4)开发模拟消化系统的新设备、新技术;5)扩大 RS 应用领域,如医疗业、牧畜养殖业等。

参考文献:

- [1] ENGLYST H N, WIGGINS H S, CUMMINGS J H. Determination of the nonstarch polysaccharides in plant food by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol acetates[J]. *Analyst*, 1982, 107(1272): 307-318.
- [2] ASP N G. Preface: resistant starch[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(2): 1.
- [3] STEWART M L, ZIMMER J P. Postprandial glucose and insulin response to a high-fiber muffin top containing resistant starch type 4 in healthy adults: a double-blind, randomized, controlled trial[J]. *Nutrition*, 2018, 53: 59-63.
- [4] SHEN D Q, BAI H, LI Z P, et al. Positive effects of resistant starch supplementation on bowel function in healthy adults: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2016, 68(2): 149-157.
- [5] LOCKYER S, NUGENT A P. Health effects of resistant starch[J]. *Nutrition Bulletin*, 2017, 42(1): 10-41.
- [6] BIRT D F, BOYLSTON T, HENDRICH S, et al. Resistant starch: promise for improving human health[J]. *Advances in Nutrition*, 2013, 4(6): 587-601.
- [7] FUENTES-ZARAGOZA E, SÁNCHEZ-ZAPATA E, SENDRA E, et al. Resistant starch as prebiotic: a review[J]. *Starch/Stärke*, 2011, 63(7): 406-415.
- [8] 郑云云, 周红玲, 张帅, 等. 抗性淀粉的研究现状及展望[J]. *农产品加工*, 2016, 15(10): 61-62.

- [9] MAGALLANES-CRUZ P A, BELLO-PEREZ L A, AGAMA-ACEVEDO E, et al. Effect of the addition of thermostable and non-thermostable type 2 resistant starch (RS2) in cake batters[J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2020, 118: 1-9.
- [10] WEPNER B, BERGHOFER E, MIESENBERGER E, et al. Citrate starch: application as resistant starch in different food systems [J]. **Starch/Stärke**, 1999, 51(10): 354-361.
- [11] 焦桂爱, 唐绍清, 罗炬, 等. 水稻品种 Basmati 370 和 Koshihikari 抗性淀粉颗粒 RS2 的研究[J]. **中国水稻科学**, 2009, 23(2): 197-200.
- [12] SARAWONG C, SCHOENLECHNER R, SEKIGUCHI K, et al. Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour[J]. **Food Chemistry**, 2014, 143: 33-39.
- [13] 武俊超. 豌豆抗性淀粉的制备及其性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [14] SIMONS C W, HALL C, VATANSEVER S. Production of resistant starch (RS3) from edible bean starches[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2018, 42(4): 1-6.
- [15] NANI R, SUPARMO, ENI H, et al. Physicochemical properties, *in vitro* starch digestibility, and estimated glycemic index of resistant starch from cowpea (*Vigna unguiculata*) starch by autoclaving-cooling cycles[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2020, 142(6): 191-200.
- [16] LI L Y, YUAN T Z, AI Y F. Development, structure and *in vitro* digestibility of type 3 resistant starch from acid-thinned and debranched pea and normal maize starches[J]. **Food Chemistry**, 2020, 318: 1-8.
- [17] LI Y D, XUA T C, XIAO J X, et al. Efficacy of potato resistant starch prepared by microwave-toughening treatment [J]. **Carbohydrate Polymers**, 2018, 192: 299-307.
- [18] MASATCIOGLU T M, SUMER Z, KOKSEL H. An innovative approach for significantly increasing enzyme resistant starch type 3 content in high amylose starches by using extrusion cooking[J]. **Journal of Cereal Science**, 2017, 74: 95-102.
- [19] LIU Y Q, LIU J G, KONG J, et al. Citrate esterification of debranched waxy maize starch: structural, physicochemical and amylolysis properties[J]. **Food Hydrocolloids**, 2020, 104: 1-8.
- [20] SHA X S, XIANG Z J, BIN L, et al. Preparation and physical characteristics of resistant starch (type 4) in acetylated indica rice[J]. **Food Chemistry**, 2012, 134(1): 149-154.
- [21] HUIJBRECHTS A M L, DESSE M, BUDTOVA T, et al. Physicochemical properties of etherified maize starches[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2008, 74(2): 170-184.
- [22] 张立, 李云云, 高群玉. 湿热交联甘薯抗性淀粉的制备及理化性质研究[J]. **粮食与饲料工业**, 2016(1): 16-21.
- [23] LIN H, CHEN Y X. Review on theory and technology research of starch-lipid complex[J]. **Agricultural Science & Technology**, 2016, 17(8): 1947-1951.
- [24] CHEN B Y, GUO Z B, ZENG S X, et al. Paste structure and rheological properties of lotus seed starch-glycerin monostearate complexes formed by high-pressure homogenization[J]. **Food Research International**, 2018, 103: 380-389.
- [25] WANG R, LIU P F, CUI B, et al. Effects of different treatment methods on properties of potato starch-lauric acid complex and potato starch-based films[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2019, 124: 34-40.
- [26] 董吉林, 杨溢, 申瑞玲, 等. 燕麦淀粉-硬脂酸复合物的制备及其性质研究[J]. **粮食与油脂**, 2019, 32(5): 15-19.
- [27] 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.
- [28] 邵颖, 魏宗烽. 板栗 RS3 型抗性淀粉超声波-酸法制备及体外消化特性的研究[J]. **中国食品添加剂**, 2018(1): 103-109.
- [29] 李姗姗, 杨平, 徐昕, 等. 马铃薯抗性淀粉的制备及其体外消化性质研究[J]. **农产品加工**, 2019, 472(2): 18-19.
- [30] 曾红华, 谢涛, 杨莉, 等. 几种薯类与豆类抗性淀粉的抗消化性及其益生效应[J]. **中国粮油学报**, 2012, 27(11): 30-33.
- [31] SHI M M, GAO Q Y. Physicochemical properties, structure and *in vitro* digestion of resistant starch from waxy rice starch[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2011, 84(3): 1151-1157.
- [32] BILAL A A, GANI A, WANI I A, et al. Production of resistant starch from rice by dual autoclaving-retrogradation treatment; *in vitro* digestibility, thermal and structural characterization[J]. **Food Hydrocolloids**, 2016, 56: 108-117.
- [33] SUN S L, HONG Y, GU Z B, et al. Effects of acid hydrolysis on the structure, physicochemical properties and digestibility of

- starch-myristic acid complexes[J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2019, 113: 1-8.
- [34] QUINTERO-CASTANO V D, CASTELLANOS-GALEANO F J, ÁLVAREZ-BARRETO C I, et al. *In vitro* digestibility of octenyl succinic anhydride-starch from the fruit of three Colombian Musa[J]. **Food Hydrocolloids**, 2020, 103: 1-5.
- [35] ARAVIND N, SISSONS M, FELLOWS C M, et al. Optimisation of resistant starch II and III levels in durum wheat pasta to reduce *in vitro* digestibility while maintaining processing and sensory characteristics [J]. **Food Chemistry**, 2013, 136 (2): 1100-1109.
- [36] ARP C G, MARÍA J C, FERRERO C. Kinetic study of staling in breads with high-amylose resistant starch[J]. **Food Hydrocolloids**, 2020, 106: 1-8.
- [37] WONGSAGONSUP R, PUJCHAKARN T, JITRAKBUMRUNG S, et al. Effect of cross-linking on physicochemical properties of tapioca starch and its application in soup product[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2014, 101: 656-665.
- [38] 李宏升. 大米淀粉-脂肪酸复合物的制备、性质及对米粉品质影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [39] 翟文奕. 一种高抗性淀粉、低血糖指数主食馒头的研制及品质评价[D]. 济南: 济南大学, 2015.
- [40] RAUNGRUSMEE S, SHRESTHA S, SADIQ M B, et al. Influence of resistant starch, xanthan gum, inulin and defatted rice bran on the physicochemical, functional and sensory properties of low glycemic gluten-free noodles[J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2020, 126: 1-9.
- [41] TIAN S Q, SUN Y. Influencing factor of resistant starch formation and application in cereal products: a review[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2020, 149 (15): 424-431.
- [42] KAHRAMAN K, AKTAS-AKYILDIZ E, OZTURK S, et al. Effect of different resistant starch sources and wheat bran on dietary fibre content and *in vitro* glycaemic index values of cookies[J]. **Journal of Cereal Science**, 2019, 90(1): 1-6.
- [43] 张伟, 张焕新, 武云龙. 银杏抗性淀粉蛋糕的研制及其消化性能评价[J]. **食品工业科技**, 2018, 39(19): 168-174.
- [44] LIU X, LU K, YU J G, et al. Effect of purple yam flour substitution for wheat flour on *in vitro* starch digestibility of wheat bread [J]. **Food Chemistry**, 2019, 284(4): 118-124.
- [45] 陈日新, 王昱, 王伟, 等. 抗性淀粉对油炸调理鸡排品质特性的影响[J]. **肉类研究**, 2019, 33(7): 36-41.
- [46] SANZ T, SALVADOR A, FISZMAN S M, et al. Resistant starch (RS) in battered fried products: functionality and high-fibre benefit[J]. **Food Hydrocolloids**, 2008, 22(4): 543-549.
- [47] 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): 1-9.
- [48] 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(1): 1155-1161.
- [49] HASSAN H, GOMA A, SUBIRADE M, et al. Novel design for alginate/resistant starch microcapsules controlling nisin release[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2020, 153(15): 1186-1192.