

# RS3 型抗性淀粉的研究进展

曾超<sup>1</sup>,刘艺琳<sup>1</sup>,肖媚方<sup>1</sup>,刘斌<sup>1,2</sup>,曾峰<sup>1,\*</sup>

(1.福建农林大学食品科学学院,福建福州 350002;

2.福建农林大学国家菌草工程技术研究中心,福建福州 350002)

**摘要:**随着人们生活水平的提高以及膳食结构的改变,高血糖和高血脂等与饮食相关代谢紊乱疾病的发生率也逐渐增大。抗性淀粉作为一种新型膳食纤维,能显著影响人体代谢,改善因膳食结构不合理而引起的代谢综合症。抗性淀粉又称抗酶解淀粉,不能被人体胃和小肠的消化酶分解吸收,但可被结肠有益菌发酵产生乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸,具有调节糖脂代谢、改善肠道菌群结构和代谢等功能。作为RS3型抗性淀粉的回生淀粉(老化淀粉),与其他类型的抗性淀粉相比具有更高的热稳定性,且色泽白皙、无异味、持水性低、口感细腻,在食品工业中具有广阔的应用前景,受到了国内外学者的广泛关注。本文通过对RS3的制备方法、结构特性、生理功能及其在食品中的应用进行综述,以期对RS3型抗性淀粉的研究和开发提供参考和依据。

**关键词:**RS3,制备方法,结构特性,生理功能,应用

## Research Progress of Resistant Starch Type 3

ZENG Chao<sup>1</sup>, LIU Yi-lin<sup>1</sup>, XIAO Mei-fang<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1,2</sup>, ZENG Feng<sup>1,\*</sup>

(1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2.National Engineering Research Center of JUNCAO Technology,

Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** With the improvement of people's living standard and the change of dietary structure, the incidence of diet-related metabolic disorders such as hyperglycemia and hyperlipidemia is increasing gradually. As a new kind of dietary fiber, resistant starch can significantly affect human metabolism and improve metabolic syndrome caused by unreasonable dietary structure. Resistant starch is also called indigestible starch, which cannot be digested by the body's digestive enzymes in the stomach and small intestine, but can be fermented by probiotics in the colon, producing short chain fatty acids such as acetic acid, propionic acid and butyric acid. Resistant starch can regulate glycolipid metabolism, improve the structure and metabolism of intestinal microbiota. Resistant starch type 3 (RS3) is known as retrograded starch (aging starch), has greater thermal stability than the other kinds of resistant starch. It also shows white color and lustre, with no objectional odor, low water-holding capacity, and delicate taste. RS has broad application prospects in the food industry, and more and more scientists at home and abroad have paid attentions to it. In this paper, the preparation methods, structural characteristics, physiological functions of RS3 and its applications in food are reviewed in order to provide reference and basis for the research and development of RS3.

**Key words:** RS3; preparation methods; structural characteristics; physiological functions; applications

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)07-0338-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.056

引文格式:曾超,刘艺琳,肖媚方,等.RS3型抗性淀粉的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(7):338-344.

淀粉作为日常膳食的一部分,是人体能量的重要来源,经消化后转化成血糖为机体提供能量,但并非所有的淀粉都能被人体消化转化为葡萄糖,例如抗性淀粉(Resistant starch, RS)。抗性淀粉又称抗酶解淀粉,在人体的胃部和小肠中不能被消化酶分解,到达结肠后可被益生菌发酵产生乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸(SCFAs),能发挥类似膳食纤维的功能,促进功能性结肠微生物的生长,具有预防结肠癌、改

善胰岛素抵抗、降血脂等功效<sup>[1-2]</sup>。抗性淀粉可分为5类<sup>[3-4]</sup>:RS1(物理包埋淀粉),主要存在于部分研磨的谷物和种子中;RS2(抗性淀粉颗粒),主要存在于天然高直链玉米淀粉、绿香蕉和生马铃薯等中;RS3(回生淀粉),指淀粉经过糊化、冷却过程而产生的抗消化淀粉;RS4(化学改性淀粉),指通过酯化、醚化或交联等修饰作用,产生新官能团的淀粉;RS5(直链淀粉-脂类复合物),指淀粉与脂肪酸或脂肪醇等形成

收稿日期:2019-05-08

作者简介:曾超(1994-),男,本科,研究方向:碳水化合物化学与营养,E-mail:2768202784@qq.com。

\*通讯作者:曾峰(1984-),男,博士,讲师,研究方向:碳水化合物化学、分子营养学,E-mail:fengzengfz@163.com。

基金项目:福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT170196);福建省自然科学基金(2019J05045)。

的复合物。其中 RS3 除了具备其他类型抗性淀粉的功能特性外,还具有结构紧密、热稳定性高、持水性低、色泽白皙、无异味、口感细腻等特性<sup>[5]</sup>。由于 RS3 的优良特性,RS3 应用于热加工食品中能够保持自身稳定,不易发生分解,也不会影响食物原本的色泽。同时相比于传统膳食纤维,将 RS3 加入食物中不产生粗糙感和不良气味,可保持食物的原有风味。在食品研究、开发与生产中,添加 RS3 抗性淀粉食品的经济效应潜力巨大,国内外学者对 RS3 的研究也愈发深入。本文对近年来 RS3 型抗性淀粉的制备方法、形成过程、结构特性、生理功能及其在食品中的应用进行综述,以期对 RS3 型抗性淀粉的研究和开发提供思路。

## 1 RS3 型抗性淀粉的形成过程

RS3 型抗性淀粉又称回生淀粉、老化淀粉,其形成多发生在淀粉类食物经热加工糊化与冷却过程中,淀粉发生凝沉或者重结晶,形成具有紧密结构的抗酶解淀粉,其特点包括透明度下降、粘性降低和持水性下降,主要存在于冷米饭、冷馒头、冷面包等食品中。目前国内外学者对 RS3 的形成机理有比较统一的认识<sup>[6]</sup>:食物中的淀粉颗粒在水分充足以及加热条件下,原淀粉颗粒结构被破坏,淀粉粒中的直链淀粉分子以无规则卷曲的形式从淀粉粒中溶入水中,并与水分子发生水合作用形成淀粉凝胶,发生糊化。随着温度的降低,直链淀粉分子间开始相互靠拢,分子与分子之间形成氢键进而发生相互缠绕形成双螺旋结构,双螺旋结构分子又进一步发生折叠,形成以氢键为连接的双螺旋结构多聚合体,最终形成了具有紧密结构的结晶区(如图 1)<sup>[6]</sup>。消化酶的活性部位难以与 RS3 的结晶区结合,因此无法水解 RS3 中的  $\alpha$ -1,4 糖苷键,赋予 RS3 抗酶解的功能特性。一般来说,直链淀粉分子聚合度介于 10~100 之间时有利于双螺旋的形成,并且聚合度越高,越易形成双螺旋结构。

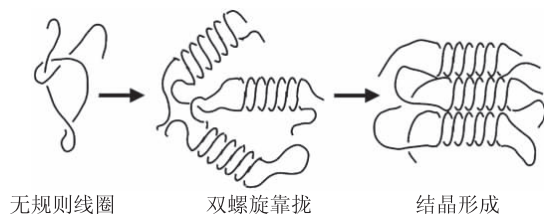


图 1 RS3 的形成过程

Fig.1 Formation process of RS3

## 2 RS3 型抗性淀粉的制备

基于 RS3 的形成机理,目前相关研究主要通过物理、化学以及酶法等技术,使天然淀粉中直链淀粉分子数量增加或使直链淀粉分子从淀粉粒中充分暴露逸出,以促进 RS3 的生成。制备 RS3 型抗性淀粉的主要技术有:压热法、挤压法、酸解法、酶解法、超声波法和微波法等。

### 2.1 压热法

压热法制备 RS3 通常是将淀粉乳置于高温高压的条件下,经过一段时间处理使淀粉充分糊化,该过

程中淀粉颗粒晶体结构被彻底破坏,直链淀粉分子充分逸入水中,形成淀粉凝胶。之后在 4 °C 条件下对淀粉凝胶进行老化处理,促进 RS3 的形成。在 RS3 制备过程中,压热温度、回生时间是影响 RS3 产率的重要因素。Dundar 等<sup>[7]</sup>分别以压热温度 140 和 145 °C,回生时长 24、48、72 h 对高直链玉米淀粉进行处理,结果显示,压热温度越高,回生时间越长,RS3 的产率也相应提高。因此,适当提高压热温度,延长回生时间有利于 RS3 产率的提高。另外,淀粉乳浓度、压热时间、淀粉乳 pH 值等对 RS3 产率也有影响,而且各参数影响程度均有差异。宋洪波等<sup>[8]</sup>利用压热法制备淮山药 RS3 抗性淀粉,结果发现影响 RS3 得率的主次顺序为:淀粉乳浓度 > pH 值 > 压热时间。李涛等<sup>[9]</sup>制备紫山药 RS3 时发现压热时间比淀粉乳浓度对产物得率的影响更显著,其中原因可能是不同原料中直链淀粉与支链淀粉的含量存在差异。在抗性淀粉的生产中,通常将压热法与酶法进行联用,以提高 RS3 的得率。李宝瑜等<sup>[10]</sup>用压热-普鲁兰酶法制备紫薯 RS3,并与单一压热法进行比较。结果表明,复合法制备的紫薯 RS3 抗性淀粉含量为 17.16%,单一压热法为 10.23%,相比于单一压热法,压热-酶法联用的产率提高了 67.74%。因此,压热法与酶法的联合作用,能够有效提高 RS3 的产率。

### 2.2 挤压法

挤压法是一种新兴的 RS3 制备技术,其原理在于将淀粉与水配成混合物倒入螺旋挤压器中,通过螺旋杆的快速转动对淀粉产生高温、高压、剪切作用,迫使淀粉颗粒崩解,部分淀粉分子发生链断裂,直链淀粉含量增加并发生糊化。Ye 等<sup>[11]</sup>利用单螺旋杆挤压机在 30 kg/h 的喂料速度和 37.50 r/min 的螺杆转速条件下对湿度分别为 30%、40%、50% 的大米淀粉进行处理,发现随着物料含水量的增加,淀粉凝胶化程度也相应增大,结果表明,在较高水分含量条件下挤压淀粉,产生的 RS3 抗性淀粉含量相应较高。Neder-Suárez 等<sup>[12]</sup>以玉米淀粉为原料,使其水分含量处于 20%~40%,挤压温度处于 90~130 °C,研究水分含量和挤压温度对 RS3 产率的影响,结果表明,随着含水量和挤压温度的升高,RS3 含量增加。这主要是由于在一定的湿度范围内,物料含水率越高,淀粉颗粒越易膨胀,淀粉颗粒在被挤压的过程中淀粉链之间以及淀粉链分子内部之间的氢键更易被破坏,促进了淀粉的糊化。另外,Masatcioglu 等<sup>[13]</sup>以两种不同直链含量的玉米淀粉为原料制备 RS3 抗性淀粉,发现在物料含水量 60%、转速 100 r/min、机筒温度 140 °C 时,RS3 的产率最高,分别为 40.00% 和 45.10%。所以,在利用挤压法制备 RS3 过程中,产率会受到物料类型和螺旋挤压参数的影响。挤压法也可作为制备抗性淀粉的预处理方法,与其他方法联用。

### 2.3 酶解和酸解法

由于支链淀粉会干扰直链淀粉凝沉<sup>[14]</sup>,在 RS3 制备过程中可采用酶解法或酸解法对支链淀粉进行

脱支处理。通过添加相应的酸或脱支酶将支链淀粉分子的 $\alpha$ -1,6糖苷键切断,使支链淀粉分子脱支,从而形成更多的短链直链淀粉分子,使淀粉糊在老化过程中更易形成RS3。

在酶解法中,最常用的脱支酶是普鲁兰酶。将淀粉糊降温至酶的最适反应温度时,加入普鲁兰酶对支链淀粉进行脱支,普鲁兰酶也常与能够作用于 $\alpha$ -1,4糖苷键的耐高温 $\alpha$ -淀粉酶联用,以增加游离直链淀粉分子的含量。在利用酶解法制备RS3时,酶的用量和酶解时间对游离直链淀粉分子的形成起关键作用。康怀彬等<sup>[15]</sup>利用嗜冷普鲁兰酶对玉米淀粉进行脱支处理,发现随着普鲁兰酶用量增加,RS3的得率先增加后下降,对脱支时间进行单因素实验时也发现此规律。Shi等<sup>[16]</sup>在利用普鲁兰酶制备蜡质玉米RS3时,发现随着普鲁兰酶添加量的增加(5、10、15、20 ASPU/g),RS3的产率也逐渐上升(15.97%、16.38%、17.03%、27.69%),但普鲁兰酶添加量达到30 ASPU/g时,RS3产率却下降至18.02%。运用普鲁兰酶法制备RS3时,酶的添加量和脱支时间需要严格控制。酶添加量过少或脱支时间过短,游离直链淀粉分子的数量相应减少,在淀粉凝胶中的空间阻碍作用则较强。酶添加量过多或脱支时间过长,则会产生过多不易形成RS3的低聚合度短链直链淀粉分子,导致淀粉分子链间难以相互聚集,从而阻碍RS3的形成。姚奥林等<sup>[17]</sup>以普通玉米淀粉为原料,同时比较了纤维素酶单独处理和纤维素酶-普鲁兰酶联合处理对RS3产率的影响。结果显示,纤维素酶-普鲁兰酶联用法的RS3得率为28.10%,高于单独使用纤维素酶的产率(19.59%),表明复合酶法在RS3的制备中更加有效。采用复合酶法制备RS3,其较高的RS3得率引起了人们的关注。

盐酸对淀粉具有较高的水解效率,酸解法运用于制备RS3已有报道。在酸解法中,一般是在淀粉糊化前,将酸试剂加入淀粉悬浊液中。酸法制备RS3需要考虑淀粉乳浓度、酸添加量、酸解时间、酸解温度等对RS3得率的影响。此外,不同类型的酸试剂也会影响RS3的产率。尹秀华等<sup>[18]</sup>分别利用盐酸、磷酸、柠檬酸和乳酸制备木薯RS3抗性淀粉,并对抗性淀粉含量进行了比较。结果显示,由于盐酸、磷酸的酸性较强,二者对淀粉乳的水解程度明显高于柠檬酸和乳酸,RS3得率相应更高。这是因为制备RS3时,酸的添加主要是为了促进淀粉的水解,产生更多聚合度适宜的直链淀粉分子,而不同的酸试剂其酸性一般不同,对淀粉分子的水解能力存在差异。所以,合理选择酸试剂能够提升淀粉乳的水解程度,进而促进RS3的形成。

## 2.4 微波法和超声波法

微波法和超声波法是近年来兴起的制备RS3的技术,两者都是利用物理效应将淀粉分子之间或内部的化学键切断,从而改变淀粉原来的化学结构和性质。

微波法又称微波膨化法,利用其制备RS3的原理是微波可以使淀粉乳由内而外迅速升温,水分快

速蒸发,淀粉分子间的氢键被切断,同时产生膨化效应,加速淀粉糊化。此外,膨化效应会造成淀粉糊出现酥松多孔的结构,使得消化酶类更容易与淀粉分子结合,有利于与酶法联用。为制备RS3型莲子抗性淀粉,林珊等<sup>[19]</sup>研究了微波条件对莲子RS3得率的影响。结果发现,微波时间过短会导致淀粉乳糊化不完全,微波时间过长又会使物料降解过度,产生聚合度较小的短直链淀粉分子。通过正交试验优化,在莲子淀粉乳浓度15%、微波时间120 s、微波功率640 W条件下,莲子RS3得率达到最高为39.53%。相比于压热法和超声波-压热联用法,微波法处理时间短、操作简单,但微波法的RS3产率较低。微波法常与酶法联用制备RS3,刘树兴等<sup>[20]</sup>研究了微波-酶法联用制备小麦RS3,发现在小麦淀粉乳浓度30%、微波功率和时间分别为780 W和90 s、耐高温 $\alpha$ -淀粉酶添加量4 U/g、酶作用时间30 min的条件下,RS3的得率为15.20%,相比于单一的微波法得率更高。微波处理法的物理穿透力强,能够使物料糊化均匀,并且处理时间短、操作简便安全,相比传统的单一水热处理法制备RS3更加有效<sup>[21]</sup>。

超声波是一种频率大于20000 Hz的机械波,在含水的物料中传播时会产生高强度的冲击波,从而使物料内部产生空腔,物料分子发生剧烈的流动,造成极高的温度和压力,称为空化效应<sup>[22]</sup>。空化效应会导致淀粉分子内部的糖苷键断裂,产生短链直链淀粉分子,因此在利用超声法制备RS3研究中很少采用单一超声法,多采用复合法如超声-酶解法、超声-酸解法等以提高产率,而且超声作用顺序对RS3生成也有较大影响。连喜军等<sup>[23]</sup>运用超声与 $\alpha$ -淀粉酶法联合制备甘薯回生淀粉。结果发现,与超声-酶解-压热处理相比,酶解-超声-压热处理有更高的RS3产率。原因在于未酶解处理前,淀粉分子被包埋在淀粉颗粒中,其结构相对紧密,使超声处理不能有效作用于淀粉链。所以,合理安排超声作用顺序,能提高RS3产率。超声波法制备RS3是一种新颖的方法,具有操作简单、时间短、能耗低、自动化和连续化等特点<sup>[24]</sup>。

综上,压热法、脱支法(酶解和酸解法)的RS3产率高,微波和超声法操作比较简便,而挤压法尚在研究阶段,因此,RS3的制备方法各有优缺点,须根据淀粉原料的特性如直链淀粉含量、脂类含量、蛋白质含量、分子量等,来选择相应的制备方法。目前,相关研究大多联合几种方法来制备RS3,以提高产率,如压热-酶法联用、微波-酶法联用、酶法-超声-压热联用等。

## 3 RS3型抗性淀粉的结构特性

### 3.1 RS3型抗性淀粉的结晶结构

RS3是直链淀粉在老化过程中重结晶形成的具有特殊结构特性的抗性淀粉,其结晶类型主要有B型、B+V型、A+V型等。相比于其他晶型结构,B型结晶结构更加紧密,对消化酶有更强的抗性<sup>[25]</sup>。Shamai等<sup>[26]</sup>在研究RS3晶型时发现,在低温(40℃)条件下对淀粉进行老化处理时产生B型RS3,在高

温(95 ℃)条件下容易生成 A + V 型 RS3,其原因在于低温条件更容易促进直链淀粉分子聚合,从而导致结构紧密的 B 型 RS3 形成。所以,回生温度的不同导致了 RS3 晶型结构的差异。Zeng 等<sup>[27]</sup>对脱支糯米淀粉进行了反复老化处理,发现脱支淀粉的相对结晶度随着重结晶次数增多而增大,RS3 含量也相应得到提高。在利用 X-射线衍射仪进行结晶结构分析时发现 RS3 的结晶结构为 B + V 型,抗酶解性得到增强,可能是因为多次的结晶处理导致直链淀粉分子间缔合程度增大,分子间排列更加紧密,使得淀粉晶体更不易被消化酶破坏。因此,抗性淀粉结晶结构的紧密性与 RS3 的抗消化特性密切相关。

### 3.2 RS3 型抗性淀粉的热特性

差示扫描量热仪(DSC)常用于分析 RS3 的热特性。RS3 的热特性主要包括糊化温度( $T_0$ )、峰值温度( $T_p$ )、终止温度( $T_c$ )和糊化焓( $\Delta H$ )等,这些性质表征了淀粉的热稳定性。一般来说,糊化焓( $\Delta H$ )越高,RS3 热稳定性越强,抗酶解性也越强。周颖等<sup>[28]</sup>在研究双酶法制备大米 RS3 与其结构时发现,与原淀粉相比,大米 RS3 的  $T_0$ 、 $T_p$ 、 $T_c$  和  $\Delta H$  都有明显提高。Shah 等<sup>[29]</sup>对燕麦淀粉进行了双压热-回生处理,也发现回生后的燕麦淀粉相比于原淀粉的  $T_0$ 、 $T_p$  和  $T_c$  均有所提高。这是由于与原淀粉相比,RS3 的有序结构增多,导致 RS3 内部的双螺旋结构稳定,晶体结构更加紧密,发生相变所需能量也越高。一般来说,RS 的含量越高,其  $\Delta H$  亦更高, $\Delta H$  的高低与 RS 和缓慢消化淀粉的含量呈正相关,而与快速消化淀粉含量呈负相关<sup>[30-32]</sup>。

### 3.3 RS3 型抗性淀粉的微观结构

天然淀粉颗粒通常为表面光滑的不规则球形或者椭圆形。在制备 RS3 过程中,淀粉颗粒的微观结构会发生显著变化。RS3 多表现为不规则的片状聚合的紧密结构,且表面粗糙多孔,粒径大。RS3 呈现片状聚合的块状结构是由于淀粉凝胶在老化过程中双螺旋状淀粉分子链在相互垂直的两个方向上分别延伸与折叠,形成二维片层状结构<sup>[33]</sup>,而表面出现多孔现象可能与 RS3 在提纯过程中的酶解或在制备过程中的超声波处理有关。由于制备技术不同,RS3 的微观结构特征亦有所差异。Bao 等<sup>[34]</sup>分别研究了高压蒸煮法、超声高压蒸煮法、酶高压处理法和微波处理法制备的薏苡仁 RS3 结构特征,并与高直链玉米淀粉进行了比较。通过扫描电镜发现,高直链玉米淀粉是表面光滑的椭圆形颗粒,而高压蒸煮法和酶高压处理法制备的 RS3 表面具有浅层条带。超声波高压蒸煮法制备的 RS3 由于超声波的空化作用使得表面呈现孔洞状,微波处理法制备的 RS3 表面具有深层条带,并且微波处理法相比于其他方法制备的 RS3,其表面显得更加粗糙。此外,淀粉的初始水分含量同样会对 RS3 的表面微观结构产生影响。Chen 等<sup>[35]</sup>研究了水分含量对莲子抗性淀粉(LRS3)结构特性的影响,利用扫描电镜分别对由不同初始水分含量(50%~95%)莲子淀粉制备的 RS3 进行分

析,发现相比于原淀粉颗粒,所有样品都呈现片层状的粗糙表面结构,但 LRS3-50% 的表面微观结构相比其他 RS3 样品更加光滑且紧密有致。这主要是因为淀粉水分含量较高会影响老化过程中淀粉链的聚集,导致微观结构相对松散。所以不同的制备技术和条件对 RS3 的微观结构有显著的影响。另外,有研究表明 RS3 紧密有致的微观结构是引起 RS3 抗酶解特性的一个重要原因<sup>[36]</sup>。

## 4 RS3 型抗性淀粉的功能特性

现如今,随着人们生活水平的提高以及膳食结构改变,各种慢性疾病的发生率也逐渐增大。RS3 型抗性淀粉作为一种新型膳食纤维,在人体结肠内可以被肠道菌群发酵产生多种短链脂肪酸,这些短链脂肪酸可以改善人体肠道微环境以及进入血液循环影响人体代谢。RS3 能够预防和控制由于不合理的膳食结构而引起的糖尿病、肥胖、肠胃功能紊乱等代谢综合征,改善人体的生理状态。

### 4.1 调节血糖

RS3 型抗性淀粉在人体肠道内不能被消化酶降解为葡萄糖,可以减少人体对葡萄糖的转化量,其血糖生成指数极低,有助于降低餐后血糖。同时有研究表明 RS3 能够修复胰腺  $\beta$  细胞功能,提高外周组织对胰岛素的敏感性,改善胰岛素抵抗,具有稳定人体血糖的功效<sup>[37]</sup>。肖兵<sup>[38]</sup>研究了玉米 RS3 对小鼠血糖的影响,发现控制组小鼠血糖上升了 10.90%,而饲喂 RS3 的小鼠血糖值下降了 14.70%,说明玉米 RS3 能够有效降低 II 型糖尿病小鼠的血糖。Wang 等<sup>[39]</sup>研究发现莲子 RS3 对 II 型糖尿病小鼠有降糖作用,摄入莲子 RS3 可显著降低糖尿病小鼠血糖水平和提高血清胰岛素水平。以上研究都表明了 RS3 的降血糖作用,其机制可能是 RS3 刺激了肠道激素的分泌,进而促进胰岛素分泌发挥降血糖作用。

### 4.2 调节体重和血脂

RS3 是一种低血糖生成指数的膳食纤维,被人体摄入后不会引起热量的增加,同时还具有类似传统膳食纤维增加人体饱腹感的功能,有助于控制体重。RS3 在降低人体总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白(LDL),提高高密度脂蛋白(HDL)水平等方面也有重要作用。邱敏懿等<sup>[40]</sup>研究了芭蕉芋 RS3 对肥胖型高脂血症小鼠的减肥降脂作用,发现芭蕉芋 RS3 能有效降低小鼠体重、脂肪质量、体脂率、脂/体比、Lee's 指数以及血清中 TC、TG、LDL 水平和提高 HDL 水平。在 Triwitono 等<sup>[41]</sup>的研究中也发现 RS3 的摄入使小鼠的体重减轻,脂肪组织细胞体积减小,细胞密度增加。以上研究都表明 RS3 在控制体重、降低血脂方面的功效,其降脂机制可能与肠道发酵产物 SCFAs 经血液循环进入肝脏后使肝组织中胆固醇的代谢相关基因的表达水平增强有关。

### 4.3 改善肠道微环境

调节肠道微环境,预防结肠癌是 RS3 的重要功能。RS3 在人体结肠内多种有益菌(拟杆菌、双歧杆菌、乳酸菌等)的发酵作用下产生乙酸、丙酸、丁酸等

多种短链脂肪酸和气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 等),SCFAs作用于肠道环境后可使pH下降,从而抑制结肠中不适合在酸性环境下生存的有害微生物繁殖。同时酸性条件还有利于Ca、Mn、Fe等元素以无机盐的形式被肠道吸收<sup>[42]</sup>,其消化产生的气体还能够使粪便蓬松、体积增大,从而促进肠道蠕动,加快体内废物的排出,减少结肠癌的发生。此外,由于RS3表面通常为不规则的多孔隙结构,利于肠道有益菌的吸附,能使部分有益菌群免受胆汁酸盐的影响,为有益菌群提供了良好的黏附和供能环境,促进了肠道有益微生物的增殖,进一步改善肠道微环境<sup>[43-44]</sup>。

## 5 RS3型抗性淀粉在食品中的应用

在日常膳食中,经过精细加工的食物易导致膳食纤维摄入不足。而膳食纤维在预防结肠癌,控制体重等方面有特殊功效。因此,开发具有高膳食纤维的功能性食品已成为一种趋势。然而传统膳食纤维(如小麦麸皮、甜菜纤维等)的添加容易出现产品口感粗糙等问题,RS3因具有热稳定性强、持水性低、口感细腻等优良特性而被作为传统膳食纤维的替代品用于食品中。

### 5.1 在蛋糕中的应用

蛋糕的营养价值高、质地蓬松、风味独特,是一种受众面广的烘焙食品。蛋糕的制作对面筋含量没有过高要求,向蛋糕中添加一定量的RS3不仅不会影响蛋糕品质,还能够增强蛋糕的品质特性<sup>[45]</sup>。吴津蓉等研究了小麦RS3在蛋糕制作中的应用,结果发现,添加RS3可以明显减缓蛋糕的变硬速度,在RS3添加量为2%~3%时,蛋糕松软程度的保持效果达到最佳<sup>[46]</sup>。另外,向制作蛋糕的原料中添加适量RS3在增加膳食纤维的同时也能起到良好的保鲜效果。

### 5.2 在面条中的应用

面条作为一种传统的主食,其消费量大,覆盖面广,但因其血糖生成指数高,糖尿病患者不适宜食用。RS3的热量低,可以降低餐后血糖,因此,向面条中添加RS3有助于解决此问题。为探究RS3的添加对面条品质的影响,张钟等<sup>[47]</sup>将制备的RS3玉米抗性淀粉按一定的比例添加到面条中。结果表明,向面条中添加RS3后,面条的断裂率、蒸煮损失率有所上升,而硬度、粘性、咀嚼度以及回复性呈下降趋势。但在感官综合评价中,添加适量RS3(5%~15%)的面条与传统面条相比差异并不显著,尚在可接受范围内。因此,适量添加RS3有助于开发功能性面条。

### 5.3 在面包中的应用

在传统面包制作中,RS3的应用也有相关报道。Gavurníková等<sup>[48]</sup>研究了RS3的添加量对面包不同参数的影响。结果发现,向面团中添加RS3后由于发酵酶无法作用于RS3,发酵过程中产生的 $\text{CO}_2$ 减少,导致面包体积相对于对照组(普通面包)略有减小,但在可接受范围内。同时还发现在一定添加范围内(0%~15%),面包的口感与普通面包相比差异不显著,而且随着RS3添加量增加,面包表皮光泽度增大。人群接受度调查结果显示,在面团中添加

15%含量的RS3时,面包的口感最佳。因此,在面包食品中添加适量RS3,不仅不会对面包感官品质产生不良影响,还可赋予面包功能特性。

### 5.4 在酸奶中的应用

酸奶是一种发酵乳产品,因其在调节人体肠道菌群方面有良好效果,备受大众青睐。有研究表明RS3可以作为一种增稠剂应用到酸奶制作过程中,这对酸奶的研发具有积极意义。张嫒<sup>[49]</sup>为制作具有多种生理功能的搅拌型保健酸奶,以能够影响酸奶乳清析出量、粘度和酸度的RS3作为增稠剂添加到酸奶中,发现当添加量达到0.80%~1.20%时,相比于传统酸奶,其口感更加爽滑,酸甜适口,感官品质达到最佳。因此,在酸奶中添加RS3,可以提高酸奶品质。同时,由于RS3相比于传统增稠剂羟丙基二淀粉磷酸酯的价格更低,能够降低酸奶生产成本。

### 5.5 其他方面的应用

RS3具有良好的抗消化特性,有相关研究表明RS3可以作为某些药物的载体,经口服进入人体后,在肠道内RS3能够对药物形成保护作用,防止被消化酶降解,并在结肠内被定点缓慢释放,从而起到靶向治疗结肠疾病的作用<sup>[50-51]</sup>。另外,根据RS3对热稳定的特性,有研究发现RS3也可应用于油炸食品中,在提升膳食纤维含量的同时,还能获得较好的接受度<sup>[52]</sup>。

## 6 结论与展望

RS3是一种新型膳食纤维,拥有预防或辅助调节糖脂代谢紊乱及改善肠道微环境等功能。RS3良好的物理特性(持水性低、热稳定性高、无异味、色泽白皙等)使其在功能性食品的开发上具有较高的潜在应用价值,对传统淀粉工业的发展产生了深远影响。虽然近年来国内外学者在对RS3的制备方法、结构特性、功能特性及其在食品中的应用取得了众多研究成果,但尚有一些问题值得进一步探索。首先,在现今的RS3制备技术应用方面,RS3得率普遍不高,对淀粉资源造成了不同程度的浪费,因此开发高RS3得率的新型制备技术是一种趋势。其次,RS3比其他类型抗性淀粉具有更好的热稳定性,且能提高烘焙或油炸食品的品质和功能性质,在烘焙或油炸食品中的应用广泛,然而,在长时间高温处理下,RS3在食品中仍有部分损失,易引起食品品质和功能下降,因此,提高RS3的热稳定性是当今研究的一个重要方向。再次,RS3生理功能的研究大多停留在动物水平,是否对人体具有同样的生理功效并没有深入研究,所以还需明确RS3对人体生理功能影响。最后,根据以往研究,抗性淀粉与人体肠道菌群之间联系紧密,但RS3抗性淀粉促进肠道益生菌群繁殖的机制尚不明确,有待进一步发掘。

### 参考文献

- [1] Nguyen Doan H X, Song Y, Lee S, et al. Characterization of rice starch gels reinforced with enzymatically-produced resistant starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 76-82.
- [2] Ashwar B A, Gani A, Shah A, et al. Preparation, health

- benefits and applications of resistant starch—a review[J]. *Starch/Stärke*, 2016, 68(3–4): 287–301.
- [3] Mao X, Lu J, Huang H, et al. Four types of winged yam (*Dioscorea alata* L.) resistant starches and their effects on ethanol-induced gastric injury *in vivo* [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85: 21–29.
- [4] Ma Z, Boye J I. Research advances on structural characterization of resistant starch and its structure–physiological function relationship: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(7): 1059–1083.
- [5] Recife A C D, Meneguín A B, Cury B S F, et al. Evaluation of retrograded starch as excipient for controlled release matrix tablets [J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2017, 40: 83–94.
- [6] Haralampu S G. Resistant starch—a review of the physical properties and biological impact of RS3 [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 41(3): 285–292.
- [7] Dundar A N, Gocmen D. Effects of autoclaving temperature and storing time on resistant starch formation and its functional and physicochemical properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 97(2): 764–771.
- [8] 宋洪波, 张丽芳, 安凤平, 等. 压热法制备淮山药抗性淀粉及其消化性 [J]. *中国食品学报*, 2014, 14(7): 59–65.
- [9] 李涛, 黄群, 宋洪波, 等. 紫山药抗消化淀粉的制备及水解特性 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(9): 160–166.
- [10] 李宝瑜, 郑宝东, 曾绍校, 等. 压热–酶法制备紫薯抗性淀粉的工艺优化 [J]. *热带作物学报*, 2015, 36(7): 1330–1335.
- [11] Ye J, Liu C, Luo S, et al. Modification of the digestibility of extruded rice starch by enzyme treatment ( $\beta$ -amylolysis): An *in vitro* study [J]. *Food Research International*, 2018, 111: 590–596.
- [12] Neder–Suárez D, Amaya–Guerra C, Quintero–Ramos A, et al. Physicochemical changes and resistant–starch content of extruded cornstarch with and without storage at refrigerator temperatures [J]. *Molecules*, 2016, 21(8): 1064.
- [13] 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.
- [14] Berry C S. Resistant starch: Formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fiber [J]. *Journal of Cereal Science*, 1986(4): 301–314.
- [15] 康怀彬, 尤晓颜, 肖天天, 等. 嗜冷普鲁兰酶制备玉米抗性淀粉工艺优化及其表征 [J]. *食品科学*, 2016, 37(16): 8–13.
- [16] Shi M, Chen Y, Yu S, et al. Preparation and properties of RS III from waxy maize starch with pullulanase [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 33(1): 19–25.
- [17] 姚奥林, 李欣欣, 张胜男, 等. 复合酶法制备玉米抗性淀粉工艺参数的优化 [J]. *食品科技*, 2015, 40(5): 289–294.
- [18] 尹秀华, 谭瑶瑶, 吴亨, 等. 不同酸法制备木薯抗性淀粉的比较 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(21): 107–110.
- [19] 林姗, 黄灿灿, 吴小婷, 等. 微波法制备莲子抗性淀粉工艺参数的优化 [J]. *热带农业科学*, 2015, 35(6): 66–71.
- [20] 刘树兴, 杨麒, 赵广蒙. 直链淀粉含量对小麦 RS3 型抗性淀粉得率的影响 [J]. *食品科技*, 2016, 41(12): 226–231.
- [21] Mutlu S, Kahraman K, Öztürk S. Optimization of resistant starch formation from high amylose corn starch by microwave irradiation treatments and characterization of starch preparations [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 95: 635–642.
- [22] Nie H, Li C, Liu P, et al. Retrogradation, gel texture properties, intrinsic viscosity and degradation mechanism of potato starch paste under ultrasonic irradiation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017(95): 590–600.
- [23] 连喜军, 罗庆丰, 刘学燕, 等. 超声波对甘薯回生抗性淀粉生成的作用 [J]. *食品研究与开发*, 2011, 32(1): 61–64.
- [24] 杨小玲, 赵维, 陈佑宁, 等. 超声酶解法制备玉米抗性淀粉的结构及性质 [J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(24): 11–14.
- [25] 周定婷, 马蓁, 许江彬, 等. 体外消化对超声–高压处理的豌豆抗性淀粉的结构和理化特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2019(11): 85–90.
- [26] Shamai K, Bianco–Peled H, Shimoni E. Polymorphism of resistant starch type III [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54(3): 363–369.
- [27] Zeng F, Chen F, Kong F, et al. Structure and digestibility of debranched and repeatedly crystallized waxy rice starch [J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 348–353.
- [28] 周颖, 章萍萍, 孟少华, 等. 大米抗性淀粉双酶制备及其结构表征 [J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(2): 22–25.
- [29] Shah A, Masoodi F A, Gani A, et al. *In vitro* digestibility, rheology, structure, and functionality of RS3 from oat starch [J]. *Food Chemistry*, 2016, 212: 749–758.
- [30] Chung, H., Lim, H. S., Lim, S. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 43(3): 353–359.
- [31] Hu X, Xie Y, Jin Z, et al. Effect of single-, dual-, and triple-retrogradation treatments on *in vitro* digestibility and structural characteristics of waxy wheat starch [J]. *Food Chemistry*, 2014, 157: 373–379.
- [32] Xie Y, Hu X, Jin Z, et al. Effect of repeated retrogradation on structural characteristics and *in vitro* digestibility of waxy potato starch [J]. *Food Chemistry*, 2014, 163: 219–225.
- [33] 张红霞, 金佳幸, 李炎, 等. 响应面法优化山药抗性淀粉制备及结构分析 [J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(6): 46–52.
- [34] Bao C, Zeng H, Zhang Y, et al. Structural characteristics and prebiotic effects of semen coicis resistant starches (type 3) prepared by different methods [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 105: 671–679.
- [35] Chen C, Fu W, Chang Q, et al. Moisture distribution model describes the effect of water content on the structural properties of lotus seed resistant starch [J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 449–458.
- [36] Zeng F, Zhu S, Chen F, et al. Effect of different drying methods on the structure and digestibility of short chain amylose crystals [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 721–731.
- [37] 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.

[38]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.

[39] Wang Q, Zheng Y, Zhuang W, et al. Genome - wide transcriptional changes in type 2 diabetic mice supplemented with lotus seed resistant starch [ J ]. Food Chemistry, 2018, 264: 427-434.

[40]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.

[41] Triwitono P, Marsono Y, Murdiati A, et al. Physiological effects of mung bean starch RS3 on the obesity index and adipose cell profile of sprague - dawley rats [ J ]. Pakistan Journal of Nutrition, 2016( 10 ): 913-920.

[42] Fuentes - Zaragoza E, Riquelme - Navarrete M J, Sánchez - Zapata E, et al. Resistant starch as functional ingredient: A review [ J ]. Food Research International, 2010, 43( 4 ): 931-942.

[43] Zhang Y, Zeng H, 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.

[44]刘树兴,候敏,徐晨,等.抗性淀粉对益生菌增殖作用的研究[J].食品科技,2019,44(1):14-20.

[45]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.

[46]吴津蓉,党建磊.压热-酶法提高小麦中抗性淀粉及其在蛋糕中应用研究[J].粮食与油脂,2016,29(2):38-41.

[47]张钟,李凤霞,张惠英.玉米抗性淀粉的添加对面条品质的影响[J].粮食与饲料工业,2014(1):24-26.

[48] Gavurníková S, Havrlentová M, Kraic J. Effects of starchy and  $\beta$ -glucan additives on flour, dough, and bread parameters [ J ]. Acta Alimentaria, 2014, 43( 2 ): 210-217.

[49]张嫒.RS3抗性淀粉对酸奶品质的影响[J].江苏农业科学,2010(5):417-419.

[50] Yongbo Dinga, Qinlu Lina, Jianquan Kan. Development and characteristics nanoscale retrograded starch as an encapsulating agent for colon - specific drug delivery [ J ]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2018, 171: 656-667.

[51] Chen L, Song J, Qian Y, et al. Increased preventive effect on colon carcinogenesis by use of resistant starch (RS3) as the carrier for polysaccharide of *Larimichthys crocea* swimming bladder [ J ]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 15 ( 1 ): 817-829.

[52] Sanz T, Martínez - Cervera S, Salvador A, et al. Resistant starch content and glucose release of different resistant starch commercial ingredients: effect of cooking conditions [ J ]. European Food Research and Technology, 2010, 231( 5 ): 655-662.

(上接第337页)

scad ( *Decapterus maruadsi* ) and comparison of its role with myofibril - bound serine proteinase in the degradation of myofibrillar proteins [ J ]. Food Chemistry, 2012, 133( 4 ): 1560-1568.

[58]赵飞,王转花.丝氨酸蛋白酶抑制剂的结构特点及作用机制[J].山西大学学报:自然科学版,2008,31(S1):166-170.

[59] Osatomi K, Sasai H, Cao M J, et al. Purification and characterization of myofibril - bound serine proteinase from carp *Cyprinus carpio* ordinary muscle [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology, 1997, 116( 2 ): 183-190.

[60] Singh A, Benjakul S. Effect of serine protease inhibitor from squid ovary on gel properties of surimi from Indian mackerel [ J ]. Journal of Texture Studies, 2017, 48( 6 ): 541-549.

[61] Singh A, Benjakul S. Serine protease inhibitors from squid ovary: extraction and its effect on proteolysis and gel properties of surimi [ J ]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54( 1 ): 267-275.

[62] Zhang L, Zhang F, Wang X. Effects of hydrolyzed wheat gluten on the properties of high - temperature (  $\geq 100$  °C ) treated surimi gels [ J ]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 196-202.

[63] Tao Y, Papk J W. Textural and rheological properties of Pacific whiting surimi as affected by nano - scaled fish bone and heating rates [ J ]. Food Chemistry, 2015, 180: 42-47.

[64] Zhou X, Jiang S, Zhao D, et al. Changes in physicochemical properties and protein structure of surimi enhanced with camellia tea oil [ J ]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 84: 562-571.

[65] Zhang T, Li Z, Wang Y, et al. Effects of konjac glucomannan

on heat - induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels [ J ]. Food Research International, 2016, 83: 152-161.

[66] Wu S. Effect of pullulan on gel properties of *Scomberomorus niphonius* surimi [ J ]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 93( Part A ): 1118-1120.

[67] Kong W, Zhang T, Feng D, et al. Effects of modified starches on the gel properties of Alaska Pollock surimi subjected to different temperature treatments [ J ]. Food Hydrocolloids, 2016, 56( 1 ): 20-28.

[68]梁燕,周爱梅,郭宝颜,等.超高压对草鱼鱼糜凝胶特性的影响及其机理初探[J].食品工业科技,2015,36(1):86-90.

[69]陈燕婷,林露,高星,等.超高压对带鱼鱼糜凝胶特性及其肌原纤维蛋白结构的影响[J/OL].食品科学,2019.http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20190215.1524.004.html.

[70]谢宇恒.新技术对鱼糜凝胶特性的影响[J].安徽农业科学,2018,46(25):29-31.

[71]邱春江.超高压对鲢鱼中关键酶与结构蛋白质构影响的研究[D].无锡:江南大学,2014.

[72]陈竟豪,苏晗,马冰迪,等.鱼糜制品品质控制技术研究进展[J].食品研究与开发,2019,40(6):200-206.

[73] Deng S, Lv L, Yang W, et al. Effect of electron irradiation on the gel properties of *Collichthys lucidus* surimi [ J ]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 130: 316-320.

[74] Ji L, Xue Y, Zhang T, et al. The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi proteinopolysaccharide gels [ J ]. Food hydrocolloids, 2017, 63: 77-84.