

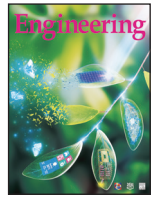


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Food Safety and Health—Review

淀粉基膳食食品的设计及其结构研究

柏玉香^{a,b,c}, 李晓晓^{a,b}, 纪杭燕^{a,b}, 王禹^{a,b}, 郑丹妮^{a,b}, 王艳丽^{a,b}, 金征宇^{a,b,c,*}

^a State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

^b School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

^c Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, University, Wuxi, 214122, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 November 2018

Revised 1 December 2018

Accepted 3 January 2019

Available online 24 December 2020

关键词

糖
淀粉
纤维
膳食食品

摘要

碳水化合物是食物的主要成分之一，也是人类膳食的主要能量来源，通常包括糖类、淀粉和纤维。在这三大来源中，淀粉是储量最丰富的碳水化合物之一。研究淀粉不仅可以加深人们对淀粉在人体中的功能的理解，而且有助于开发设计新的淀粉基膳食食品。本文首先综述了国内外对快消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）等的最新研究进展，然后介绍了淀粉基膳食食品消化率的体内和体外测定方法。在此基础上，提出了通过直接添加变性淀粉或改变加工条件来设计新型淀粉基膳食食品的研究策略。最后，本文对淀粉类食品未来的研究方向进行了展望。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

碳水化合物是自然界中应用最广泛的物质之一，也是食品的主要成分之一。膳食碳水化合物是人类饮食的主要能量来源，也是决定餐后血糖水平的主要因素（图1）。除碳水化合物外，富含碳水化合物的食物也在很大程度上受膳食纤维的数量、种类及其相应的物理结构的影响。此外，这些食物还能调节体内的血糖水平。1981年，首次提出血糖生成指数（glycemic index, GI）的概念[1]。GI可以量化碳水化合物食物升高血糖水平的效能。同时，它可以提供体内葡萄糖清除率的定量描述。除GI外，最近还引入了“血糖负荷”（glycemic load, GL）的概念，为食物的GI与该食物中可利用的碳

水化合物含量的乘积。GL的主要优点是能够量化高碳水化合物食物的总体血糖效应[2]。

在西方饮食中，碳水化合物占热量摄入的主要部分，文献报道显示将近一半的热量摄入来自碳水化合物，而狩猎者饮食中22%~40%的热量也来自碳水化合物[4]。受益于碳水化合物食物的多样性，我们的营养状况和健康可以得到充分满足。同时，这些食物也给我们带来了更多的乐趣和享受。然而，除了这些有利特性外，也出现了各种与这些食物可能产生的副作用有关的问题。例如，有报道称，这些食物对血糖控制和血脂浓度有一些不良影响。更严重的是，有报告表明，大量摄入精制碳水化合物食物会造成餐后血糖和胰岛素水平的提高。此外，还会导致餐后血浆甘油三酯增加，加速肥

* Corresponding author.

E-mail address: fpcenter@jiangnan.edu.cn (Z. Jin).

胖，高密度脂蛋白（high density lipoprotein, HDL）胆固醇水平降低[5]。

碳水化合物包括三种不同的类型：糖、淀粉和纤维（非淀粉多糖）。糖在人类历史上扮演着重要的角色，关于糖在饮食模式中的重要作用有许多记载。这主要源于糖在生物生命中的基本作用。例如，葡萄糖，尽管其结构简单，但由于其在人类健康方面的核心作用，它仍是世界卫生组织（WHO）的基本药物之一。虽然糖是人体重要的能量供应者，但摄入高剂量的糖对人体代谢是一种挑战，并可能导致一些疾病[6]。糖（包括总糖、添加糖和游离糖）的摄入量超过推荐水平目前是一个全球公共卫生问题。因此，WHO决定复审《成人和儿童糖摄入量指南》，该指南建议将成人和儿童的游离糖摄

入量降至总能量摄入量的10%以下[7,8]。游离糖包括制造商、厨师或消费者添加到食品中的单糖和二糖，以及蜂蜜、糖浆、果汁和浓缩果汁中的天然糖[8]。尽管糖类对人类健康有不利影响，但新型糖是介于单糖和多糖之间的功能性低聚糖（图2），有利于人类健康，这主要归因于它们重要的物理化学和生理特性。因此，人们对膳食食品中低聚糖的需求量也越来越大[9]。与单糖相比，功能性低聚糖具有独特的优势，例如，功能性低聚糖由于很少释放葡萄糖而不会刺激血糖应答或胰岛素分泌的增加。同时，它们还可以改变肠道菌群，改善肠道环境[10,11]。通过摄入功能性低聚糖也可以达到抑制腹泻等症状的目的。此外，还可提高对钙、镁、铁等多种矿物的吸附效率[12,13]，并且减少结肠癌、肥胖症等“都

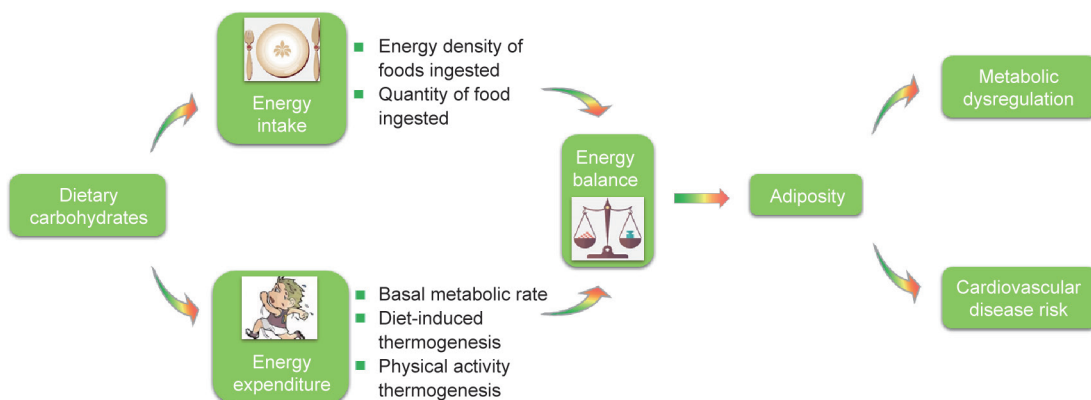


图1. 能量平衡时各组分与膳食碳水化合物之间的相互作用示意图，以及能量过剩对人体健康的影响[3]。

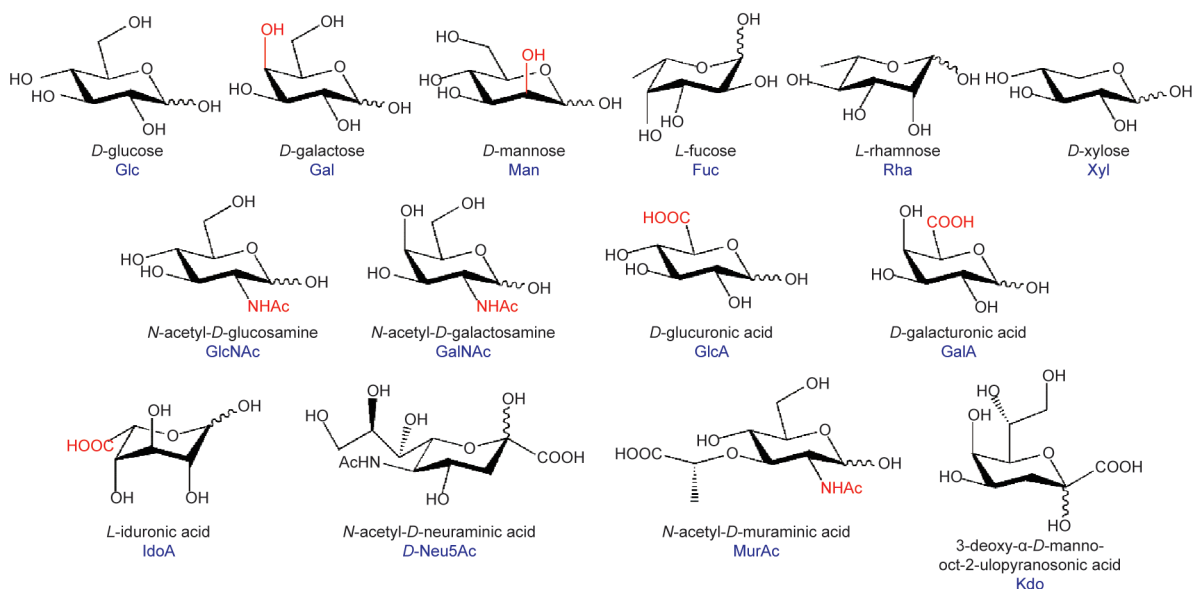


图2. 功能性低聚糖中常见的单糖[15]。

市病”。因此，食用功能性低聚糖可降低上述风险[14]。

淀粉是世界上储量最丰富的碳水化合物之一，广泛存在于植物的块茎、根、叶、果实和种子等不同器官中。在人类饮食中，大米、小麦和玉米的谷粒，或者马铃薯和木薯的块茎，都是主食和重要的能量来源[17]。膳食淀粉实际上是一种葡聚糖，或者更具体地说，是由糖苷键连接的D-葡萄糖单体链。一旦被肠道淀粉酶消化，它就会释放出容易被人体吸收的葡萄糖[18]。食品加工和消费者要求淀粉具有比天然淀粉更好的行为特性。幸运的是，天然淀粉的缺点可以通过化学、物理或酶改性来克服。功能性淀粉是指通过不同的改性方法赋予特定功能特性的变性淀粉，如生理功能、健康益处、吸收功能、持续缓慢的能量释放等功能。研究人员对开发功能性淀粉制备的新方法有着浓厚的兴趣，其中更侧重于酶和物理修饰。功能淀粉理化性质和多尺度结构也已经通过现代分析技术得到了良好的评价。

现代消费者对个人健康越来越重视，其中对膳食食品的要求不仅是美味诱人，还要兼顾安全和健康。因此，消费者更倾向于选择有营养的食物。具有多种生理功能的抗消化类碳水化合物，包括膳食纤维、低聚糖和抗性

淀粉，引起了大众的广泛关注。

2. 膳食淀粉的分类、制备和应用

淀粉作为一种主要的膳食能量来源，具有生物聚合物功能，并在许多植物器官中充当储能碳水化合物。餐后小肠中淀粉的消化率主导着食物的消化程度，从而提高了血糖和胰岛素水平，这与营养密切相关。降低餐后血糖被公认是健康的，Englyst等[19]根据消化率将淀粉分为三类：快消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）。本节将详细介绍三种膳食淀粉及其对人体的影响。此外，还包括淀粉类食品的测定方法。

2.1. 快消化淀粉

2.1.1. RDS 的定义和生理特性

膳食淀粉的主要成分是RDS。经湿热处理的淀粉类食品（面包和土豆）中含有大量的RDS，其定义为“在20 min内通过酶解消化快速转化为葡萄糖分子的淀粉”[19]。基于体内餐后血糖反应，RDS与血糖生成指数显著相关[20]。如果食物中RDS含量过高，它会将葡

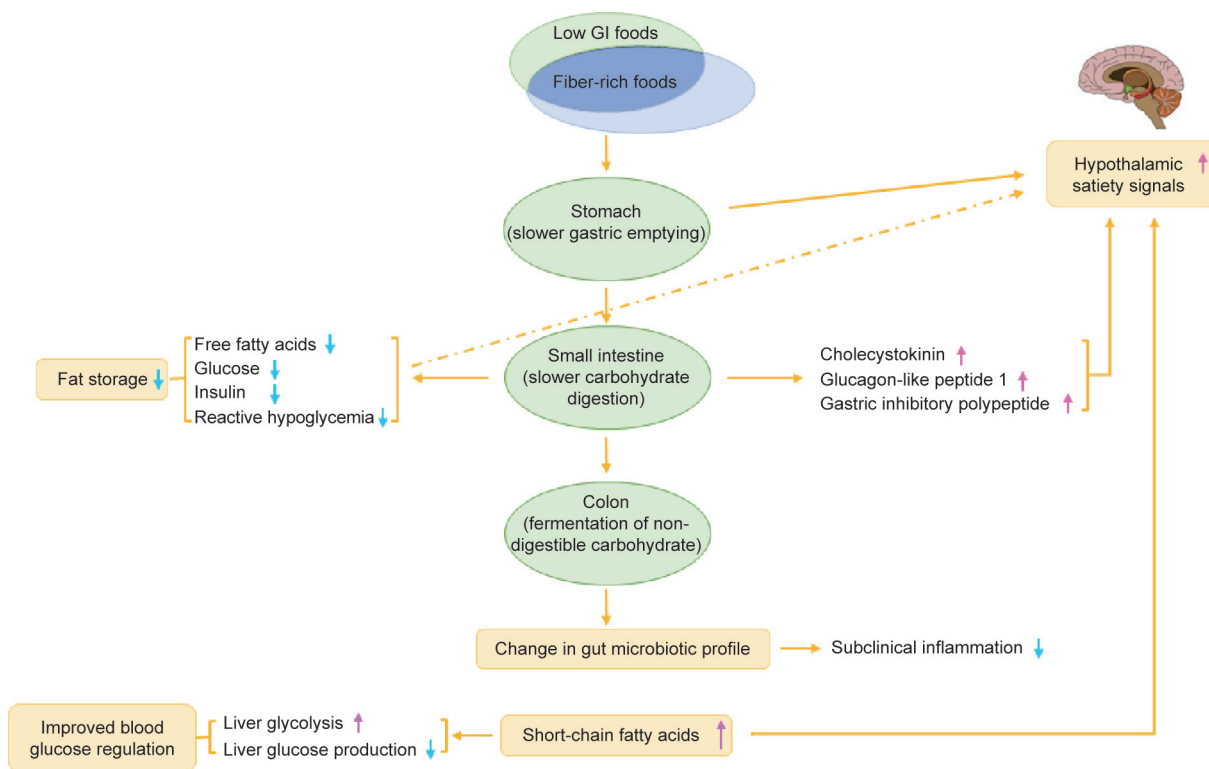


图3. 低GI和高纤维食品的可能机制概述[16]。

葡萄糖迅速释放到血液中，从而提高血糖和胰岛素反应，不利于健康[21]。

2.1.2. RDS 的制备和应用

淀粉的消化率受食品加工条件的影响很大[22,23]，进而影响RDS在食物中的比例。通常来说，糊化后RDS的比例会有所升高。研究显示，糯米淀粉糊化后RDS含量增加[24]。同时，高温处理也将增大许多谷物淀粉中RDS的比例。用微波炉、电饭锅、传统烤箱和高压锅煮熟的谷物含有更多的RDS[25,26]。

2.2. 慢消化淀粉

2.2.1. SDS 的定义和生理特性

SDS是指在整个小肠中消化速度较慢的淀粉，Englyst法体外测定其消化速率为20~120 min [23,27]。由于消化率较低，SDS被美国医学研究所（Institute of Medicine, IOM）视为一种膳食纤维，因为膳食纤维通常是指植物中难以消化或低消化性的碳水化合物[28]。关于对人体健康的作用方面，SDS能够保持餐后葡萄糖代谢稳定，降低患糖尿病的风险，并具有更好的心理及生理表现。

此外，与高GI的RDS相比，SDS具有中低水平的GI，可以降低食品的GL [29]。与使用速煮易消化的玉米淀粉制成的餐食相比，含有慢消化的蜡质玉米淀粉的食物可使血糖和胰岛素的峰值浓度降低[30,31]。与RDS相比，SDS可诱导餐后血糖和胰岛素水平的延迟反应，并在一段时间内能够持续提供能量。根据先前的文献报道，肥胖患者缓慢摄入葡萄糖可改善其代谢状况。并且这种情况尤其发生在餐后胰岛素血症中，伴随着甘油三酯和存在于富含甘油三酯的脂蛋白中的载脂蛋白在较低的水平循环[32]。一般来说，由于饮食中摄入过多的碳水化合物和脂质而诱发的糖尿病，实际上是一种代谢紊乱。2型糖尿病（type-2 diabetes mellitus, T2DM）是由于血液中胰岛素分泌的绝对或相对不足而引起，已成为一种常见的内分泌及代谢性疾病。据文献报道，含SDS的食物可改善接受胰岛素治疗的2型糖尿病患者的碳水化合物代谢，降低胰岛素需求[33]。

在对健康志愿者进行的测试中，与快吸收的碳水化合物相比，一份主要含有SDS的早餐能够减轻早晨疲乏的表现[34]。葡萄糖能够为大脑提供能量，而对葡萄糖饮料的相关研究也展现出积极的影响，结果显示葡萄糖能够改善8%的注意力（ $P < 0.07$ ）[35]。这表明

餐后稳定的低胰岛素反应在饱腹感调节中起着重要作用，进一步支持了SDS对饱腹感的有益影响。慢消化的大麦仁和白面包对照组的比较也显示出类似的结果[36]。由此可见，SDS对饱腹感有一定影响，即影响餐后血糖和胰岛素水平。然而，关于饱腹感的机制还应继续研究，包括吸附特性、膳食成分、胃肠激素以及与小肠的接触。

2.2.2. SDS 的制备及应用

目前SDS主要通过酶法、物理法和化学法制备。酶法脱支处理一般使用 α -淀粉酶、普鲁兰酶或异淀粉酶[37]水解淀粉分子中的 α -1,4-糖苷键和 α -1,6-糖苷键从而破坏淀粉的结构，产生更多的短链。普鲁兰酶脱支-重结晶法已被用于处理糊化的蜡质玉米淀粉，制备高含量的SDS [38]。结果表明，酶法脱支处理有利于SDS的生成。在化学改性方面，辛烯基琥珀酸酐（octenyl succinic anhydride, OSA）酯化是提高SDS含量的最有效改性方法之一。OSA改性淀粉在人体试验中能够明显诱导低血糖应答反应，这与SDS的葡萄糖释放曲线延长的结果一致[39]。通过环氧丙烷交联或糊精化处理普通淀粉（直链淀粉含量为27%）、蜡质玉米淀粉、角蜡质玉米淀粉（直链淀粉含量为0）和高直链淀粉（直链淀粉含量为50%）也可制备SDS [40]。有学者报道，将甘薯淀粉的水分含量调整至50%，并在55 °C热处理12 h后，最高SDS含量可达31% [41]。此外，将蜡质大米淀粉和非蜡质大米淀粉的水分含量调至20%（湿基），在淀粉晶体的熔融温度（ T_m ）下微波加热1 h，得到的SDS具有更好的热稳定性[42]。

SDS可以添加到蛋糕、面包、饼干、披萨、膳食补充剂和糖尿病食品等多种食品中，有助于控制能量释放。此外，SDS产品可以延缓葡萄糖的释放，为运动员提供足够的能量，以避免耐力运动带来的疲劳。卡路里相关的健康危害也可以通过用碳水化合物替代典型食物中的脂肪来避免[43]。鸡具有随着淀粉摄入的增加而增加胰淀粉酶分泌的能力[44]。通过淀粉基质和化合物的官能团之间的相互作用，淀粉对各种亲水和疏水化合物的结合及包封能力得以增强，这使相应衍生物在给药领域具有良好的应用前景。

2.3. 抗性淀粉

2.3.1. RS 的定义和生理特性

与其他两种淀粉不同，抗性淀粉（RS）不能在小肠

中消化,只能在结肠中发酵。20 min内就被消化完全的淀粉为RDS(使用体外Englyst法测定),20~120 min间被消化的淀粉为SDS,剩余无法消化的淀粉则称为RS[23]。RS实际上是多种不同物质的混合物,可将其分为五类,即物理难接近淀粉(RS1)、生淀粉颗粒(RS2)、回生淀粉(RS3)、化学改性淀粉(RS4)和淀粉-脂质复合物(RS5)[45-47]。RS已被发现对人体代谢和结肠健康有益,能够改善血糖和胰岛素反应,控制脂质代谢,像益生菌一样调节肠道微生物,预防结肠癌。本节将从肠道健康、降血糖/降低胆固醇、抑制脂肪堆积和胆结石形成等方面介绍RS对人体健康的益处。

虽然RS不能在小肠中被消化吸收,但可以在大肠中被益生菌发酵利用,产生短链脂肪酸(short chain fatty acid, SCFA)、有机酸和醇类物质。其中,丁酸具有降低结肠癌风险的特殊作用,并且通过丁酸处理培养的结肠癌细胞可以抑制癌细胞增殖,刺激细胞凋亡[48]。据报道,RS有可能通过在远端结肠中提高纤维发酵并减轻红肉诱导的结直肠DNA损伤来抵消结肠癌风险[49]。

益生元作为难以消化的碳水化合物,可以选择性刺激胃肠道中益生菌的生长和活性,对宿主产生有益的影响。虽然不能被小肠吸收,但RS能够提供能量促进特定优势菌群的生长[50]。例如,RS可促进大鼠胃肠道内双歧杆菌的生长[51],并在酸性缓冲液或胆汁酸溶液中提高双歧杆菌的存活率[52]。有研究通过粪便和大肠SCFA的时间依赖性变化证实了益生菌和抗性淀粉之间的良好相互作用[53]。

抗性淀粉的降血糖/降胆固醇作用已得到了广泛的研究。与其他碳水化合物相比,RS能够降低健康受试者的血清葡萄糖和胰岛素水平[54]。据报道,富含RS的食物可以降低人的餐后血糖水平[55]。这表明这些食物可能在2型糖尿病的代谢控制的补充中发挥重要作用。针对RS3对正常和高胆固醇血症大鼠胆固醇代谢影响的研究表明,RS对正常大鼠的胆固醇代谢无影响[56]。但是,它可以显著降低高胆固醇血症大鼠血浆中的游离胆固醇和总胆固醇浓度。同时,一项针对RS和纤维素对仓鼠血脂和肝脏脂质影响的研究表明,RS可以使血清胆固醇水平降低16.2%,而纤维素则使其可以降低13.5%[57]。尽管已有大量研究,但RS对人体总胆固醇水平的影响仍然存在争议。因此,RS对人体胆固醇代谢的影响还有待进一步研究。

富含RS的食物引起的附睾和腹膜后脂肪的减少可能导致体脂分布发生显著变化[58]。此外,硫酸皮肤素通过增加胰岛素分泌显著影响胆结石的形成,这反过来又刺激了胆固醇的合成。因此,RS可降低胆结石的发病率[59]。由于磨粉过程增加了淀粉的消化率,大米和小麦是易消化淀粉的主要来源[60]。而在美国、欧洲和澳大利亚等发达国家和地区,RS的摄入量比在印度和中国等食用高淀粉食品的发展中国家高2~4倍[46]。这也可以解释前几个国家胆结石病例较多的原因[61,62]。

2.3.2. RS 的制备及应用

许多改性方法已用于RS的制备。有研究发现热蒸汽处理豆类淀粉能够提高抗性淀粉的含量[63]。然而,稍长的处理时间将导致淀粉的水解和焦糖化。此外,蒸汽处理的高成本也限制了其推广和应用。以芒果淀粉为原料,研究者采用单螺杆挤压法制备抗性淀粉,并测定淀粉乳挤压前后抗性淀粉含量的变化[64]。有研究通过将普通玉米淀粉糊化并对其进行高压灭菌和酶解处理,开发出了一种热稳定的降血糖淀粉[65]。此外,据报道,通过在热冷循环处理之前使用普鲁兰酶脱支处理可以有效改善马铃薯淀粉的抗消化能力[66]。在另一项研究中[38],通过普鲁兰酶脱支蜡质玉米淀粉,糊化后RS质量分数达到50.1% [67]。普鲁兰酶对淀粉分子脱支处理后,分子链碰撞、聚集,形成致密晶体结构的概率大大增加,RS3的产率提高。同时,有研究比较了用辛烯基琥珀酸酐(OSA)对木薯和马铃薯两种不同的块茎淀粉进行化学改性后形成的RS4。此外,还评估了使用OSA改性的普通玉米(NCS)和高直链玉米(HA7)淀粉的酶水解速率[68]。

RS具有独特的理化特性,包括能形成凝胶、粒度细、风味淡、颜色发白、溶胀指数高、黏度大、持水能力强。因此,RS被广泛应用于许多食品,如蛋糕和布朗尼。RS3由于耐高温通常用于油炸食品中。此外,RS可以改善烘焙或油炸食品的感官特征,如颜色、风味、油性和脆度。

3. 淀粉类食品消化率的测定

血糖反应的时长和速率通常用于表示淀粉的消化率。淀粉的体外和体内消化曲线如图4所示。准确测定淀粉类食品消化率的方法有几种,用于监测淀粉消化和

肠道对淀粉衍生葡萄糖吸收的速率及程度。这使得制造商可以改变每种食品的血糖反应，特别是应用在糖尿病功能性食品、糖尿病管理和碳水化合物代谢紊乱的情况下。本节将详细介绍淀粉基膳食食品消化率的主要测定方法和指标。

3.1. 体内淀粉消化

口腔中的唾液淀粉酶作用于淀粉，是消化过程中作用于碳水化合物的第一种酶[69]。在相对较短的时间内，食物通过食管的蠕动进入胃内，胃分泌出盐酸。胃液的pH值约为2.6，抑制了 α -淀粉酶的作用，但增强了淀粉的酸水解。摄入的淀粉从胃中进入十二指肠。胰液中含有消化淀粉的两个重要成分：碳酸氢盐和 α -淀粉酶。前者将胃液的酸性中和至pH值为8。 α -淀粉酶则继续将淀粉水解为葡萄糖和低聚糖。具有线性和分支结构的低聚糖如果不进一步水解为葡萄糖，就不被血液吸收。因此，必须进行进一步的酶解[70]。

未被 α -淀粉酶消化的底物在小肠中被黏膜麦芽糖酶-葡萄糖淀粉酶和蔗糖酶-异麦芽糖酶水解为单个葡萄糖。这些都是外切葡萄糖苷酶，可以作用于 α -1,4键和支链的 α -1,6键，从而确保非线性寡糖的进一步降解。获得的单糖通过次级主动运输穿过肠上皮细胞顶端膜被吸收到血液中，随后通过基侧膜离开胃肠道[71]。未消化的多糖，如RS和可溶性纤维，在含有大量微生物的大肠（结肠）中发酵而消化。发酵会导致SCFA形成，从而稳定血糖水平并抑制肝脏中的胆固醇合成[72,73]。

GI是指含50 g碳水化合物食物的标准食品血糖应答曲线下的增量面积（餐后120 min时血糖水平的变化），

它表示同一受试者对相同量的标准食物（白面包或葡萄糖）的反应比值[74,75]。新型淀粉产物的体外水解数据可有效用于预测体内的血糖反应。而血糖反应很大程度上被认为与胰岛素分泌有关。胰岛素指数（II）已被认为可用于糖尿病患者的饮食管理。II的计算公式与Jenkins Granfeldt等[76]提出的GI值计算公式相似，并且体外法发现水解指数与II显著相关[76]。

3.2. 体外淀粉消化

受人体消化系统的启发，Englyst等[19]开发了最被广泛接受的方法，以定量估算从复杂食品原料到纯淀粉的营养淀粉含量。使用胰淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶控制酶解以确定各种淀粉组分。葡萄糖氧化酶用于测定释放的葡萄糖。基于Englyst法的计算公式如下：

$$S_{TS} = (G_{TG} - G_{FG}) \times 0.9$$

$$S_{RDS} = (G_{20} - G_{FG}) \times 0.9$$

$$S_{SDS} = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9$$

$$S_{RS} = S_{TS} - S_{RDS} - G_{SDS}$$

式中， FG 、 TG 和 TS 分别表示游离葡萄糖、总葡萄糖和总淀粉； G_{20} 和 G_{120} 分别表示消化20 min和120 min后的葡萄糖含量；0.9表示葡萄糖换算成淀粉系数。此外，已经进行了许多尝试来修正该方程式。例如，荷兰国家应用科学研究院（TNO）对其进行了两大改进：一是使用混合微生物酶；二是分析特

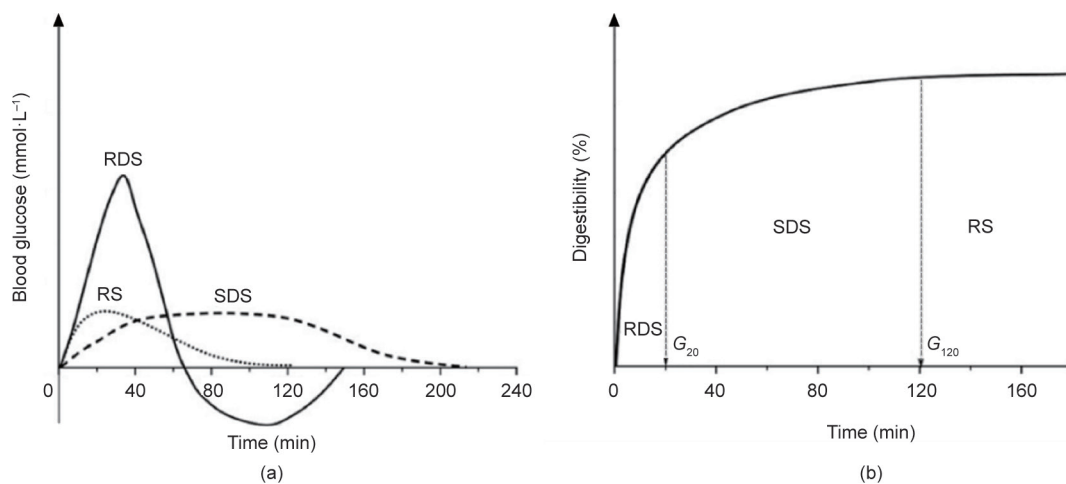


图4. 营养淀粉组分的生物利用度。(a) RDS、SDS和RS的体内血糖反应；(b) Englyst法体外消化试验[23]。

定时间点的葡萄糖释放量。文献报道, 采用TNO法得到的GI值与人体研究中各种纯碳水化合物和不同种类含碳水化合物食品的比较结果一致[77]。Englyst法仍然存在某些缺点, 包括需要各种底物、过程冗长、可重复性差等。

另外, 淀粉特性和淀粉类食品的组成等因素也会影响淀粉的体外水解过程。不同的食品中淀粉的水解率存在很大的差异: 小扁豆的水解率最低, 而煮土豆的水解率最高。Goni等[78]提出了一种改进的体外法来研究不同时间间隔下淀粉的水解, 并给出了其一级动力学方程:

$$C = C_{\infty}(1 - e^{-kt})$$

式中, C 表示在 t 时刻的反应物浓度; C_{∞} 为常数, 并表示在平衡时的反应物浓度; k 表示动力学常数。

多项研究表明淀粉黏度的变化影响其消化性。许多研究人员已经证实, 淀粉黏度的变化会影响消化率。淀粉颗粒的溶解程度和随后的酶解可使用商业的控制应力型流变仪进行表征[79]。研究表明, 在模拟消化过程中黏度降低, 且通过相对黏度可以预测部分消化的肠内容物黏度增加的程度[80]。此外, 淀粉类食品的代谢行为也可以被预测。有研究提出了一种测定食品中体外淀粉消化率的方法, 基于特殊的“食用”(咀嚼/透析试验)结构来预测其行为[76]。

4. 新型淀粉基膳食食品的结构

4.1. 通过直接添加改性淀粉设计低GI食品

随着生活水平的提高, 饮食相关的慢性代谢性疾病发生率逐年增加[81]。食物的GI值已受到越来越多的关注, 相关的研究也在增加。研究表明, 长期摄入高GI食品与肥胖、高脂血症、糖尿病、高血压以及心脑血管疾病的发生密切相关。GI值在预防和控制某些慢性疾病方面具有很强的指导意义和可操作性[82-84]。

进一步的研究表明, 目前用于制备低GI食品的方法, 通常使用低GI原料, 例如, 采用挤压技术制备的改性淀粉和复合营养食品, 其最终目的是提高RS和SDS的产品含量, 使得GI在短时间内不会迅速增加。

众多研究已经报道了基于改性淀粉的低GI食品, 如大米、面包、面条、奶酪和饼干。而微胶囊技术能够保留热敏性SDS和RS, 已被广泛用于挥发性、光敏性、温敏性和易氧化食品配料的保存。研究发现, 使用包埋

的蜡质淀粉代替支化的蜡质玉米淀粉可以开发出具有高SDS含量和一定功能特性的新产品[85]。

研究者通过用聚右旋糖 (polydextrose, PD) 作为脂肪替代品代替起酥油, 用RS增加膳食纤维含量, 并添加饼干改良剂, 生产出了乳品-杂粮复合饼干[86]。结果表明, 与对照组相比, 该饼干的总膳食纤维含量提高了142.7%, 脂肪含量降低了35%, 热量降低了28.25%。以低筋小麦粉为主要原料, 加入RS、植物油等, 研究人员开发了一种中GI产品[87], 其GI值和水解指数分别为49.19和66.72。

Montesinos-Herrero等[88]选择使用Novelose 240 (N240, 天然RS) 或Novelose 330 (N330, 降解的RS) 而非脂肪来制备奶酪。结果表明, 所制备的仿制干酪脂肪含量有一半以上被RS代替, 而熔化性保持不变。扫描电子显微镜 (SEM) 被用于表征模拟干酪的微观结构 (图5)。结果发现该成分导致奶酪变硬, 并且使用RS进一步替代了90%的脂肪, 从而生成了2%的脂肪奶酪。当水含量保持在60%时, 其硬度和内聚力值适用于切片、分割和成型。尽管奶酪脂肪很少或没有脂肪, 但仍具有良好的熔化性[89]。

有研究者评估了改良的豌豆淀粉、小麦粉和高含量的RS (PeaP) 对面包产品的影响[90]。当面粉替代品中添加PeaP的比例高达10%~20%时, 小麦面包的RS水平显著增加 (从0.70%到5.10%), 从而产生有益的影响。当面粉替代率高达20%, 能够保持面团的机械强度、拉伸强度和黏性的同时, 不影响其加工性能[91]。总的来说, RS面包的体外消化率说明还原糖释放缓慢, RS4含量增加的面包表现出较低的体外淀粉消化率。此外, RS面包相应的GI值远低于普通面包, 这在特殊膳食中至关重要。

淀粉的消化行为可以通过添加其他物质来改变, 如酚类化合物、蛋白质和多糖。研究报道, 没食子酸 (一种膳食多酚) 可以与淀粉凝胶复合, 提高RS含量, 从而降低预测GI值[92]。也有研究发现, 普鲁兰多糖可以增加SDS和RS的总含量, 同时降低RDS[93]。水凝胶 (如瓜尔胶) 是另一种类型的多糖, 由于其增稠作用, 可以降低酶对淀粉底物的可及性, 从而减少体外消化过程中的淀粉水解[94]。据报道, 大米蛋白也有助于降低淀粉的消化率, 这是因为熟淀粉聚集有序的结构以及淀粉V型结构的增加[95]。此外, 添加平菇 (*Pleurotus sajor-caju*) 粉可增加膳食纤维含量, 同时减小形成的不均匀球形淀粉颗粒的尺寸。这与淀粉颗粒的完整性相互

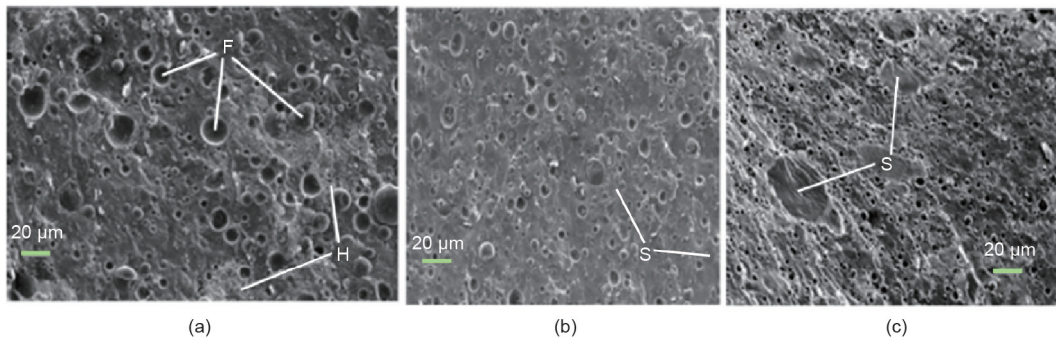


图5. 具有52%水分 (a)、12.5% Novelose 240 (500×) (b) 和12.5% Novelose 330 (800×) (c) 的奶酪的扫描电子显微镜图像 (F: 脂质体; H: 蜂窝结构; S: 淀粉)[89]。

作用, 导致淀粉对消化酶的敏感性下降、饼干的GI值降低[96]。

4.2. 通过改变加工条件设计低 GI 食品

加工条件对食品质量和消化率有重要影响[97]。经过超高压处理的草鱼的硬度、弹性和耐嚼性均高于新鲜鱼和经过冷冻处理的鱼, 表明超高压可显著改善草鱼的质量和消化率[98]。在正常的蒸煮、高压灭菌、干焙和微波烘烤条件下, 燕麦的膳食纤维和蛋白质含量也会发生变化[99]。

大米是全世界人类的主要能量来源, 是饮食营养中必不可少的碳水化合物。在大米品种和磨粉精度确定的条件下, 加工方法是影响大米食品血糖反应的重要因素, 它可能通过影响大米的成熟度、淀粉组成和理化性质进一步影响碳水化合物的消化率, 最终决定米制品的血糖反应特性。

研究表明, 在蒸煮前浸泡、加水, 延长蒸煮时间会导致蒸煮过程中淀粉的消化率更高, 而且, 冷藏后淀粉的消化率显著降低[100]。此外, 有研究发现在不同温度(80 °C、100 °C、120 °C、140 °C)和压力(0、0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa)下米饭的结构发生变化(图6、图7)[101]。随着温度升高, 米饭表面孔洞减少, 其外观(颜色和表面完整性)和质地也会发生明显变化。相反, 蒸煮压力对米饭的影响有限。其表面和内部的微观结构如图6所示。

方便米饭的加工主要包括大米的蒸煮和干燥, 这涉及淀粉的糊化和回生。结果显示, 与用电饭锅煮饭相比, 常规蒸煮的方便米饭的RDS含量下降幅度更大, 且SDS含量显著增加[102]。同时, 直链淀粉含量低的大

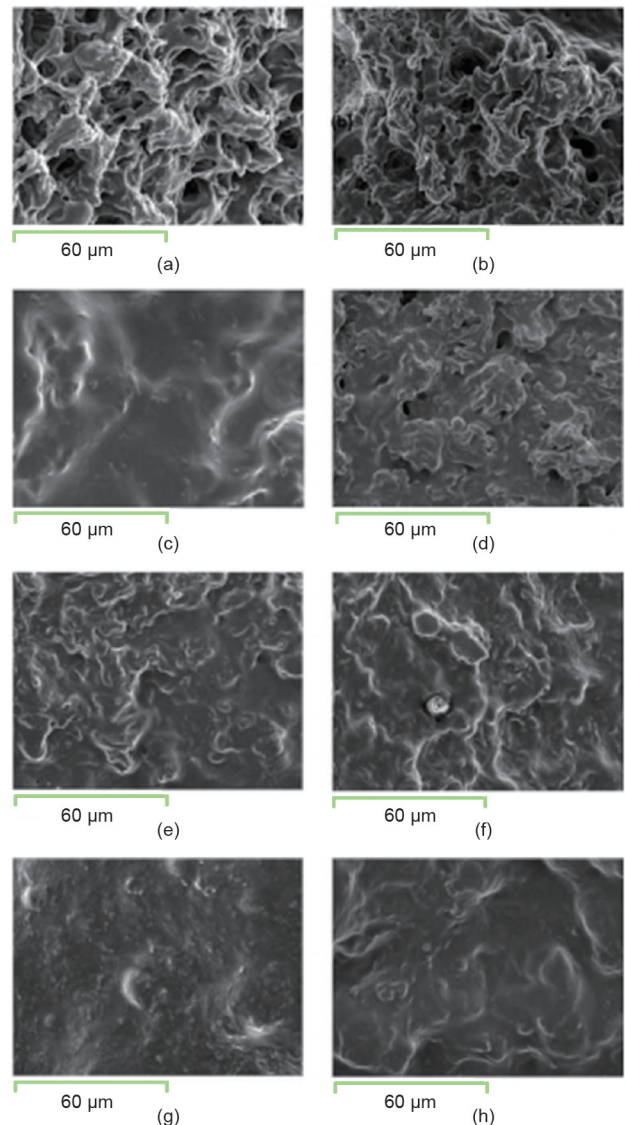


图6. 不同温度和压力下米饭表面的SEM图像。(a) 80 °C, 0 MPa; (b) 80 °C, 0.5 MPa; (c) 100 °C, 0 MPa; (d) 100 °C, 0.5 MPa; (e) 120 °C, 0.1 MPa; (f) 120 °C, 0.5 MPa; (g) 140 °C, 0.3 MPa; (h) 140 °C, 0.5 MPa [101]。

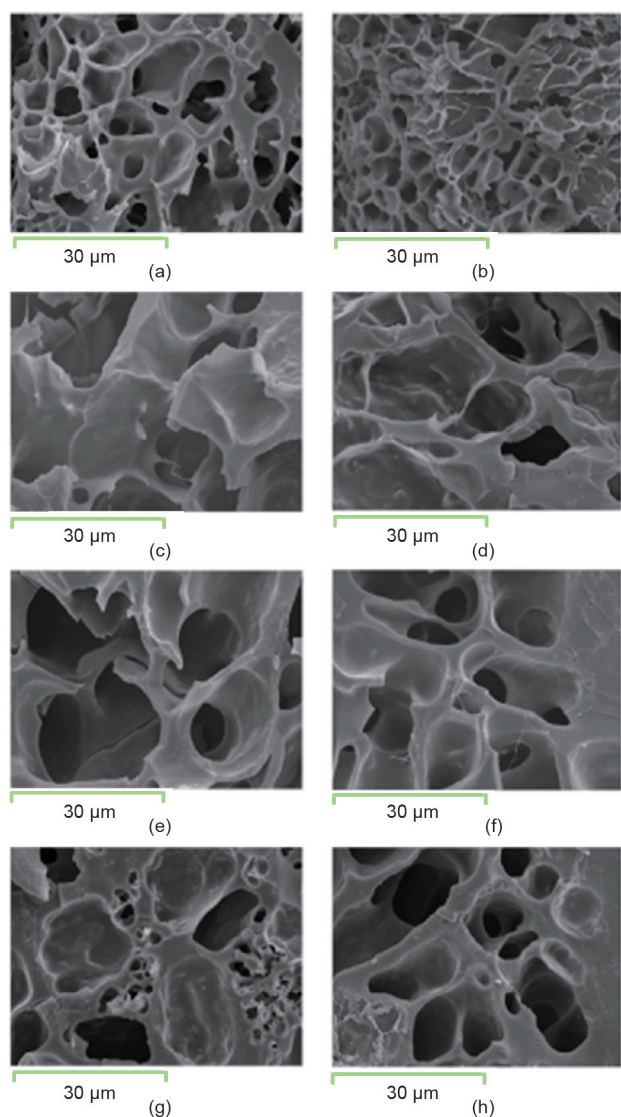


图7. 不同温度和压力下米饭内部的SEM图像。(a) 80 °C, 0 MPa; (b) 80 °C, 0.5 MPa; (c) 100 °C, 0 MPa; (d) 100 °C, 0.5 MPa; (e) 120 °C, 0.1 MPa; (f) 120 °C, 0.5 MPa; (g) 140 °C, 0.3 MPa; (h) 140 °C, 0.5 MPa [101]。

米RDS含量较低, SDS和RS含量较高, 而直链淀粉含量高的大米SDS含量较低, RS含量较高。常温常压下, 煮饭时间缩短了约30% [103]。动力学实验表明, 预浸泡大米和未浸泡大米在室温和大气压下均符合一级动力学方程。

干燥也是影响米饭品质的重要因素, 主要包括水分含量、干燥温度和气流速度。研究人员采用响应面分析法评价干燥条件对米饭品质的影响, 并对其干燥参数进行优化设计[104]。结果表明, 水分含量是最重要的因素, 而气流速度影响最小。干燥条件对米饭的质地和味道有重大影响。此外, 干燥温度影响米饭的颜色, 但对

干燥米饭的脱水和复水能力没有显著影响。通过扫描电镜观察, 不同温度下干米饭的形态相似, 但与新鲜米饭的形态不同[105]。

4.3. 展望

如今, 在现代人的饮食结构中存在大量加工食品, 而水果、蔬菜和粗粮的摄入有限。因此, 膳食纤维摄入普遍不足。与此同时, 心血管疾病、肠道疾病和糖尿病的患者人数逐年增加, 因此更强调少糖、少盐、低脂饮食的重要性。为了满足消费者的饮食习惯需求, 可口可乐于2017年在日本推出了“可口可乐Plus” [106]。该产品在保留了原有口味及零卡路里外, 还含有5 g水溶性膳食纤维, 有助减少餐后脂肪吸收。此外, “雪碧纤维+” 也在中国推出, 其零卡路里配方能够满足成人日常所需30%膳食纤维[107]。这两种新型饮料均添加了抗性糊精(一种可溶性膳食纤维), 不仅增加其在胃肠道的体积从而引起饱腹感, 还促进肠道蠕动。低能量、低热量食品逐渐成为一种新趋势, 而这也为淀粉类食品的开发提供了新的思路 and 方向。

5. 结论

随着人们对健康食品的迫切需求以及对开发新型膳食食品的兴趣日益增长, 淀粉的研究引起了人们的广泛关注。本文从淀粉的基本化学结构、淀粉类食品消化率的体内外测定方法等方面综述了淀粉相关的主要研究前沿和热点。淀粉不像单纯的化学试剂那么简单, 它是一种复杂的生物聚合物, 包括RDS、SDS和RS三类。通过应用各种表征技术, 如电子显微镜, 淀粉研究取得了巨大进展, 从而直接阐明淀粉类食品的微观形态。得益于对淀粉的基本认识, 人们设计合成了新型的淀粉基膳食食品, 以满足现代人的需求。例如, 通过直接添加变性淀粉或改变加工条件可以成功制备低GI食品。因此, 在不久的将来, 必须将基础研究与新的加工技术相结合, 来设计和生产更健康的淀粉基膳食食品。

致谢

这项工作得到了国家自然科学基金(31701644和32072268)、江苏省科技支撑计划(BE2018304)和食品

科学与技术国家一级学科建设专项 (JUFSTR20180203) 的资助。

Compliance with ethics guidelines

Yuxiang Bai, Xiaoxiao Li, Hangyan Ji, Yu Wang, Danni Zheng, Yanli Wang, and Zhengyu Jin declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- Jenkins DJ, Wolever TM, Taylor RH, Barker H, Fielden H, Baldwin JM, et al. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *Am J Clin Nutr* 1981;34(3):362–6.
- Salmerón J, Manson JE, Stampfer MJ, Colditz GA, Wing AL, Willett WC. Dietary fiber, glycemic load, and risk of non-insulin-dependent diabetes mellitus in women. *JAMA* 1997;277(6):472–7.
- Smith HA, Gonzalez JT, Thompson D, Betts JA. Dietary carbohydrates, components of energy balance, and associated health outcomes. *Nutr Rev* 2017;75(10):783–97.
- Cordain L, Miller JB, Eaton SB, Mann N, Holt SH, Speth JD. Plant-animal subsistence ratios and macronutrient energy estimations in worldwide hunter-gatherer diets. *Am J Clin Nutr* 2000;71(3):682–92.
- Sacks FM, Katan M. Randomized clinical trials on the effects of dietary fat and carbohydrate on plasma lipoproteins and cardiovascular disease. *Am J Med* 2002;113(Suppl 9B):13–24.
- Gibson S. Sugar-sweetened soft drinks and obesity: a systematic review of the evidence from observational studies and interventions. *Nutr Res Rev* 2008;21(2):134–47.
- Brouns F. WHO guideline: “sugars intake for adults and children” raises some question marks. *Agro Food Ind Hi-Tech* 2015;26(4):34–6.
- World Health Organization. Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks. Geneva: WHO Press; 2013.
- Kunz C, Rudloff S. Health promoting aspects of milk oligosaccharides. *Int Dairy J* 2006;16(11):1341–6.
- Bode L. The functional biology of human milk oligosaccharides. *Early Human Dev* 2015;91(11):619–22.
- Ma Y, Peng X, Yang J, Giovanni V, Wang C. Impacts of functional oligosaccharide on intestinal immune modulation in immunosuppressive mice. *Saudi J Biol Sci* 2020;27(1):233–41.
- Monchois V, Willemot RM, Monsan P. Glucanases: mechanism of action and structure–function relationships. *FEMS Microbiol Rev* 1999;23(2):131–51.
- Ngo DN, Kim MM, Kim SK. Chitin oligosaccharides inhibit oxidative stress in live cells. *Carbohydr Polym* 2008;74(2):228–34.
- Marionneau S, Cailleau-Thomas A, Rocher J, Le Moullac-Vaidye B, Ruvoën N, Clément M, et al. ABH and Lewis histo-blood group antigens, a model for the meaning of oligosaccharide diversity in the face of a changing world. *Biochimie* 2001;83(7):565–73.
- Zhao C, Wu Y, Liu X, Liu B, Cao H, Yu H, et al. Functional properties, structural studies and chemo-enzymatic synthesis of oligosaccharides. *Trends Food Sci Technol* 2017;66:135–45.
- Rivellese AA, Giacco R, Costabile G. Dietary carbohydrates for diabetics. *Curr Atheroscler Rep* 2012;14(6):563–9.
- Jobling S. Improving starch for food and industrial applications. *Curr Opin Plant Biol* 2004;7(2):210–8.
- Anderson GH, Cho CE, Akhavan T, Mollard RC, Luhovsky BL, Finocchiaro ET. Relation between estimates of cornstarch digestibility by the Englyst *in vitro* method and glycemic response, subjective appetite, and short-term food intake in young men. *Am J Clin Nutr* 2010;91(4):932–9.
- Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur J Clin Nutr* 1992;46(Suppl 2):S33–50.
- Englyst HN, Veenstra J, Hudson GJ. Measurement of rapidly available glucose (RAG) in plant foods: a potential *in vitro* predictor of the glycaemic response. *Br J Nutr* 1996;75(3):327–37.
- Englyst KN, Englyst HN, Hudson GJ, Cole TJ, Cummings JH. Rapidly available glucose in foods: an *in vitro* measurement that reflects the glycemic response. *Am J Clin Nutr* 1999;69(3):448–54.
- Delcour JA, Bruneel C, Derde LJ, Gomand SV, Pareyt B, Putseys JA, et al. Fate of starch in food processing: from raw materials to final food products. *Annu Rev Food Sci Technol* 2010;1(1):87–111.
- Miao M, Jiang B, Cui SW, Zhang T, Jin Z. Slowly digestible starch—a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2015;55(12):1642–57.
- Chung HJ, Lim HS, Lim ST. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. *J Cereal Sci* 2006;43(3):353–9.
- Chiu YT, Stewart ML. Effect of variety and cooking method on resistant starch content of white rice and subsequent postprandial glucose response and appetite in humans. *Asia Pac J Clin Nutr* 2013;22(3):372–9.
- Li J, Han W, Xu J, Xiong S, Zhao S. Comparison of morphological changes and *in vitro* starch digestibility of rice cooked by microwave and conductive heating. *Starch-Stärke* 2014;66(5–6):549–57.
- Zhang G, Hamaker BR. Slowly digestible starch: concept, mechanism, and proposed extended glycemic index. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2009;49(10):852–67.
- Trumbo P, Schlicker S, Yates AA, Poos M. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids. *J Am Diet Assoc* 2002;102(11):1621–30.
- Zhang G, Venkatachalam M, Hamaker BR. Structural basis for the slow digestion property of native cereal starches. *Biomacromolecules* 2006;7(11):3259–66.
- Ells LJ, Seal CJ, Kettlitz B, Bal W, Mathers JC. Postprandial glycaemic, lipaemic and haemostatic responses to ingestion of rapidly and slowly digested starches in healthy young women. *Br J Nutr* 2005;94(6):948–55.
- Wachters-Hagedoorn RE, Priebe MG, Heimweg JA, Heiner AM, Englyst KN, Holst JJ, et al. The rate of intestinal glucose absorption is correlated with plasma glucose-dependent insulinotropic polypeptide concentrations in healthy men. *J Nutr* 2006;136(6):1511–6.
- Harbis A, Perdreaux S, Vincent-Baudry S, Charbonnier M, Bernard MC, Raccach D, et al. Glycemic and insulinemic meal responses modulate postprandial hepatic and intestinal lipoprotein accumulation in obese, insulin-resistant subjects 1, 2. *Am J Clin Nutr* 2004;80(4):896–902.
- Golay A, Koellreutter B, Bloise D, Assal JP, Würsch P. The effect of muesli or cornflakes at breakfast on carbohydrate metabolism in type 2 diabetic patients. *Diabetes Res Clin Pract* 1992;15(2):135–41.
- Benton D, Ruffin MP, Lassel T, Nabb S, Messaoudi M, Vinoy S, et al. The delivery rate of dietary carbohydrates affects cognitive performance in both rats and humans. *Psychopharmacology* 2003;166(1):86–90.
- Korol DL, Gold PE. Glucose, memory, and aging. *Am J Clin Nutr* 1998;67(4):764S–71S.
- Granfeldt Y, Liljeberg H, Drews A, Newman R, Björck I. Glucose and insulin responses to barley products: influence of food structure and amylose/amylopectin ratio. *Am J Clin Nutr* 1994;59(5):1075–82.
- Rolf M, Frederico I, inventors; Innogel AG, assignee. Slowly digestible starch product. European Patent EP1725588. 2008 Jan 9.
- Miao M, Jiang Bo, Zhang T. Effect of pullulanase debranching and recrystallization on structure and digestibility of waxy maize starch. *Carbohydr Polym* 2009;76(2):214–21.
- He J, Zhang G. Preparation and digestibility of octenyl succinic anhydride starch. *J Chin Cereals Oils Assoc* 2007;22(4):71–2. Chinese.
- Wolf BW, Bauer LL, Fahey GC. Effects of chemical modification on *in vitro* rate and extent of food starch digestion: an attempt to discover a slowly digested starch. *J Agric Food Chem* 1999;47(10):4178–83.
- Shin SI, Kim HJ, Ha HJ, Lee SH, Moon TW. Effect of hydrothermal treatment on formation and structural characteristics of slowly digestible non-pasted granular sweet potato starch. *Starch-Stärke* 2005;57(9):421–30.
- Anderson AK, Guraya HS, James C, Salvaggio L. Digestibility and pasting properties of rice starch heat-moisture treated at the melting temperature (Tm). *Starch-Stärke* 2002;54(9):401–9.
- Chiu CW, Mason WR, inventors; National Starch and Chemical Investment Holding Corporation, assignee. Method of replacing fats with short chain amylose. United States Patent US5711986. 1998 Jan 27.
- Moran ET. Digestion and absorption of carbohydrates in fowl and events through perinatal development. *J Nutr* 1985;115(5):665–74.
- Nugent AP. Health properties of resistant starch. *Nutr Bull* 2005;30(1):27–54.
- Fuentes-Zaragoza E, Riquelme-Navarrete MJ, Sánchez-Zapata E, PérezÁlvarez JA. Resistant starch as functional ingredient: a review. *Food Res Int* 2010;43(4):931–42.
- Zheng B, Wang TT, Wang HW, Chen L, Zhou ZK. Studies on nutritional intervention of rice starch-oleic acid complex (resistant starch type V) in rats fed by high-fat diet. *Carbohydr Polym* 2020;246:116637.
- Birt DF, Phillips GJ. Diet, genes, and microbes: complexities of colon cancer prevention. *Toxicol Pathol* 2014;42(1):182–8.
- Richard LL, Jean W, Karen H, Claus C, Graeme Y, David T, et al. Butyrylated starch intake can prevent red meat induced O6-methyl-guanine adducts in human rectal tissue: a randomized clinical trial. *Br J Nutr* 2015;114(2):220–30.
- Lee YK, Salminen S. Handbook of probiotics and prebiotics. 2nd edition. *Inpharma Wkly* 2009;1183(1):4.
- Rodríguez-Cabezas ME, Camuesco D, Arribas B, Garrido-Mesa N, Comalada M, Bailón E, et al. The combination of fructooligosaccharides and resistant starch shows prebiotic additive effects in rats. *Clin Nutr* 2010;29(6):832–9.
- Barczynska R, Slizewska K, Jochym K, Kapusniak J, Libudzisz Z. The tartaric

- acid-modified enzyme-resistant dextrin from potato starch as potential prebiotic. *J Funct Foods* 2012;4(4):954–62.
- [53] Topping DL, Fukushima M, Bird AR. Resistant starch as a prebiotic and synbiotic: state of the art. *Proc Nutr Soc* 2003;62(1):171–6.
- [54] Holm J, Björck I. Bioavailability of starch in various wheat-based bread products: evaluation of metabolic responses in healthy subjects and rate and extent of *in vitro* starch digestion. *Am J Clin Nutr* 1992;55(2):420–9.
- [55] Reader D, Johnson ML, Hollander P, Franz M. Response of resistant starch in a food bar vs. two commercially available bars in persons with type II diabetes mellitus. *Diabetes* 1997;46(1):254A.
- [56] Vanhoof K, Schrijver D. Consumption of enzyme resistant starch and cholesterol metabolism in normo- and hypercholesterolemic rats. *Nutr Res* 1997;17(8):1331–40.
- [57] Ranhotra GS, Gelroth JA, Glaser BK. Effect of resistant starch on blood and liver lipids in hamsters. *Cereal Chem* 1996;73(2):276–87.
- [58] Pawlak DB, Bryson JM, Denyer GS, Brand-Miller JC. High glycemic index starch promotes hypersecretion of insulin and higher body fat in rats without affecting insulin sensitivity. *J Nutr* 2001;131(1):99–104.
- [59] Malhotra SL. Epidemiological study of cholelithiasis among railroad workers in India with special reference to causation. *Gut* 1968;9(3):290–5.
- [60] Heaton KW, Marcus SN, Emmett PM, Bolton CH. Particle size of wheat, maize, and oat test meals: effects on plasma glucose and insulin responses and on the rate of starch digestion *in vitro*. *Am J Clin Nutr* 1988;47(4):675–82.
- [61] Birkett AM, Mathers JC, Jones GP, Walker KZ, Roth MJ, Muir JG. Changes to the quantity and processing of starchy foods in a Western diet can increase polysaccharides escaping digestion and improve *in vitro* fermentation variables. *Br J Nutr* 2000;84(1):63–72.
- [62] Sajilata MG, Singhal RS, Kulkarni PR. Resistant starch—a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2006;5(1):1–17.
- [63] Tovar J, Melito C. Steam-cooking and dry heating produce resistant starch in legumes. *J Agric Food Chem* 1996;44(9):2642–5.
- [64] Agustiniano-Osornio JC, González-Soto RA, Flores-Huicochea E, Manrique-Quevedo N, Sánchez-Hernández L, Bello-Pérez LA. Resistant starch production from mango starch using a single-screw extruder. *J Sci Food Agric* 2005;85(12):2105–10.
- [65] Han XZ, Ao ZH, Janaswamy S, Jane JL, Chandrasekaran R, Hamaker BR. Development of a low glycemic maize starch: preparation and characterization. *Biomacromolecules* 2006;7(4):1162–8.
- [66] Berry CS. Resistant starch: formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fibre. *J Cereal Sci* 1986;4(4):301–14.
- [67] Remya R, Jyothi AN, Sreekumar J. Comparative study of RS4 type resistant starches derived from cassava and potato starches via octenyl succinylation. *Starch-Stärke* 2016;69(7–8):1600264.
- [68] Ai Y, Nelson B, Bird DF, Jane J. *In vitro* and *in vivo* digestion of octenyl succinic starch. *Carbohydr Polym* 2013;98(2):1266–71.
- [69] Hoebler C, Devaux MF, Karinthi A, Belleville C, Barry JL. Particle size of solid food after human mastication and *in vitro* simulation of oral breakdown. *Int J Food Sci Nutr* 2000;51(5):353–66.
- [70] Dona AC, Pages G, Gilbert RG, Kuchel PW. Digestion of starch: *in vivo* and *in vitro* kinetic models used to characterise oligosaccharide or glucose release. *Carbohydr Polym* 2010;80(3):599–617.
- [71] Cannon PJ. Medical physiology. *Ir J Med Sci* 1961;36(10):473–4.
- [72] Macfarlane S, Macfarlane GT. Composition and metabolic activities of bacterial biofilms colonizing food residues in the human gut. *Appl Environ Microbiol* 2006;72(9):6204–11.
- [73] Wong JMW, de Souza R, Kendall CWC, Emam A, Jenkins DJA. Colonic health: fermentation and short chain fatty acids. *J Clin Gastroenterol* 2006;40(3):235–43.
- [74] Wolever TM, Jenkins DJ, Jenkins AL, Josse RG. The glycemic index: methodology and clinical implications. *Am J Clin Nutr* 1991;54(5):846–54.
- [75] FAO/WHO Expert Consultation. Carbohydrates in human nutrition. *FAO Food Nutr Pap* 1998;66:1–140.
- [76] Granfeldt Y, Björck I, Drews A, Tovar J. An *in vitro* procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products. *Eur J Clin Nutr* 1992;46(9):649–60.
- [77] Verbeke K, Ferchaud-Roucher V, Preston T, Small AC, Henckaerts L, Krempf M, et al. Influence of the type of indigestible carbohydrate on plasma and urine short-chain fatty acid profiles in healthy human volunteers. *Eur J Clin Nutr* 2010;64(7):678–84.
- [78] Goñi I, Garcia-Alonso A, Saura-Calixto F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutr Res* 1997;17(3):427–37.
- [79] Dickinson E, McKay JE, Thomas VD, Warunek C. An improved viscometric method for monitoring starch degradation. *J Sci Food Agric* 1982;33(2):194–6.
- [80] Gee JM, Johnson IT. Rates of starch hydrolysis and changes in viscosity in a range of common foods subjected to simulated digestion *in vitro*. *J Sci Food Agric* 1985;36(7):614–20.
- [81] Willett WC, Koplan JP, Nugent R, Dusenbury C, Puska P, Gaziano TA, et al. Prevention of chronic disease by means of diet and lifestyle changes. In: Alleyne G, Breman J, Claeson M, Evans D, Jamison D, Jha P, editors. *Disease control priorities in developing countries*. Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank; 2006.
- [82] Brand-Miller J. The glycemic index as a measure of health and nutritional quality: an Australian perspective. *Cereal Foods World* 2007;52(2):41–4.
- [83] Jenkins AL. The glycemic index: looking back 25 years. *Cereal Foods World* 2007;52(2):50–3.
- [84] Wolever TMS, Mehling C. High-carbohydrate–low-glycaemic index dietary advice improves glucose disposition index in subjects with impaired glucose tolerance. *Br J Nutr* 2002;87(5):477–87.
- [85] Park I, Kim YK, Kim BH, Moon TW. Encapsulated amylosucrase-treated starch with enhanced thermal stability: preparation and susceptibility to digestion. *Starch-Stärke* 2014;66(1–2):216–24.
- [86] Aggarwal D, Sabikhi L, Kumar MHS, Panjagari NR. Investigating the effect of resistant starch, polydextrose and biscuit improver on the textural and sensory characteristics of dairy-multigrain composite biscuits using response surface methodology. *J Food Meas Charact* 2018;12(2):1167–76.
- [87] Zhang H, Zhang W, Jin Z. Development and glycemic index evaluation of resistant starch biscuits. *J Chin Cereals Oils Assoc* 2013;28(9):32–7,43. Chinese.
- [88] Montesinos-Herrero C, Cottell DC, O’Riordan ED, O’Sullivan M. Partial replacement of fat by functional fibre in imitation cheese: effects on rheology and microstructure. *Int Dairy J* 2006;16(8):910–9.
- [89] Noronha N, O’Riordan ED, O’Sullivan M. Replacement of fat with functional fibre in imitation cheese. *Int Dairy J* 2007;17(9):1073–82.
- [90] Sanz-Penella JM, Wronkowska M, Soral-Śmietana M, Collar C, Haros M. Impact of the addition of resistant starch from modified pea starch on dough and bread performance. *Eur Food Res Technol* 2010;231(4):499–508.
- [91] Arp CG, Correa MJ, Zuleta Á, Ferrero C. Techno-functional properties of wheat flour-resistant starch mixtures applied to breadmaking. *Int J Food Sci Technol* 2017;52(2):550–8.
- [92] Chi C, Li X, Zhang Y, Chen L, Xie F, Li L, et al. Modulating the *in vitro* digestibility and predicted glycemic index of rice starch gels by complexation with gallic acid. *Food Hydrocoll* 2019;89:821–8.
- [93] Chen L, Tian Y, Zhang Z, Tong Q, Sun B, Rashed MMA, et al. Effect of pullulan on the digestible, crystalline and morphological characteristics of rice starch. *Food Hydrocoll* 2017;63:383–90.
- [94] Bordoloi A, Singh J, Kaur L. *In vitro* digestibility of starch in cooked potatoes as affected by guar gum: microstructural and rheological characteristics. *Food Chem* 2012;133(4):1206–13.
- [95] Chi C, Li X, Zhang Y, Chen L, Li L. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates. *Food Hydrocoll* 2018;84:473–80.
- [96] Ng SH, Robert SD, Ahmad WANW, Ishak WRW. Incorporation of dietary fibre-rich oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*) powder improves postprandial glycaemic response by interfering with starch granule structure and starch digestibility of biscuit. *Food Chem* 2017;227:358–68.
- [97] Jia XY, Li XH, Liu X, Ma W, Zhang YB, Wang W, et al. Effect of adding soy flour on quality of nutrition strengthening quick cooking rice. *Food Sci Technol* 2014;39(1):163–8. Chinese.
- [98] Lin WL, Yang XQ, Song Y, Hu X, Li LH, Wei Y, et al. The effects of immersion chilling and freezing on prepared grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillet quality during the freezing process. *Mod Food Sci Technol* 2014;30(10):80–7. Chinese.
- [99] Shen RL, Wang Z, Dong JL. Effects of heat treatment on nutritional quality of wholegrain oat. *Food Ind* 2016;37(7):188–91. Chinese.
- [100] Liu B, Fan ZH, Cao Z. Influence of cooking treatments on digestion of rice carbohydrate. *J China Agric Univ* 2008;13(2):67–72. Chinese.
- [101] Leelayuthsoontorn P, Thipayarat A. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. *Food Chem* 2006;96(4):606–13.
- [102] Long J, Wu FF, Jin ZY, Xu XM. Effects of cooking condition and retrogradation on starch digestibility of instant rice. *J Chin Cereals Oils Assoc* 2018;33(3):1–7. Chinese.
- [103] Chen GY, Tian YQ, Jiao AQ, Xu BC, Xu XM, Jin ZY. Determination of the initial production conditions and steam cooking kinetics research for instant rice. *Food Ferment Ind* 2010;36(8):36–40. Chinese.
- [104] Zheng XZ, Liu CH, Chen ZY, Ding NY, Jin CJ. Effect of drying conditions on the texture and taste characteristics of rough rice. *Drying Technol* 2011;29(11):1297–305.
- [105] Luangmalawat P, Prachayawarakorn S, Nathakaranakule A, Soponronnarit S. Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. *LWT Food Sci Technol* 2008;41(4):716–23.
- [106] Youka N. Coca-Cola Japan to release Japan-exclusive Apple Coke [Internet]. Tokyo: Time Out; 2019 Sep 13 [cited 2019 Oct 1]. Available from: <https://www.timeout.com/tokyo/news/coca-cola-japan-to-release-japan-exclusive-apple-coke-091319>.
- [107] Dragon R. Packaging Design for Sprite Fiber+ [Internet]. Shanghai: CreativeHunt; 2016 Sep 21 [cited 2019 Oct 1]. Available from: <https://www.creativehunt.com/portfolio/2555>.