

谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展

谷少涵, 孙冰华, 马森, 王晓曦

Research Progress on the Mechanism of Grain Dietary Fiber Slowing Down Starch Digestibility

GU Shaohan, SUN Binghua, MA Sen, and WANG Xiaoxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070160>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可溶性膳食纤维对玉米淀粉体外消化的抑制作用

Inhibitory Effects of Soluble Dietary Fibers on the *in Vitro* Digestion of Corn Starch

食品工业科技. 2019, 40(19): 1-6,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.19.001>

生物酶法豆渣对淀粉理化性质及饼干消化特性的影响

Study on the Effect of Bio-enzymatic Bean Residues on the Physicochemical Properties of Starch and the Digestive Properties of Biscuits

食品工业科技. 2019, 40(19): 13-17,23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.19.003>

瓜尔豆胶对马铃薯淀粉消化性和糊化特性的影响

Effects of Guar Gum on the Digestibility and Pasting Properties of Potato Starch

食品工业科技. 2019, 40(8): 61-65,72 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.011>

酶解改性对燕麦粉中淀粉含量及消化性的影响

Effect of Enzymatic Modification on Starch Content and Digestibility of Oat Flour

食品工业科技. 2019, 40(2): 87-92 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.02.016>

物理改性对淀粉特性影响的研究进展

Research Progress on the Effect of Physical Modification on Starch Properties

食品工业科技. 2019, 40(21): 315-319,325 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.21.051>

超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化特性的影响

Effect of Micronization on the Structure and Digestibility of Tapioca Starch

食品工业科技. 2019, 40(7): 30-34,40 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.07.006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谷少涵, 孙冰华, 马森, 等. 谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 326–332. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070160

GU Shaohan, SUN Binghua, MA Sen, et al. Research Progress on the Mechanism of Grain Dietary Fiber Slowing Down Starch Digestibility[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 326–332. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070160

· 专题综述 ·

谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展

谷少涵, 孙冰华*, 马森*, 王晓曦
(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 淀粉和膳食纤维同为谷物中重要的营养物质, 均有益于人体健康。淀粉的消化速率和消化率是影响人体餐后血糖的关键因素, 膳食纤维是一种不易被肠道吸收的营养素, 因具有减缓淀粉消化的能力, 近年来备受关注。本文综述了国内外关于谷物膳食纤维对淀粉消化性的影响, 并从膳食纤维的黏度降低淀粉分解动力学、延迟胃排空和膳食纤维对淀粉的物理包埋以及完整细胞壁对淀粉的包裹这三个方面归纳总结了其减缓淀粉消化性的作用机制, 为后续低血糖生成指数食品的创制提供理论依据。

关键词: 膳食纤维, 淀粉, 消化特性, 黏度, 物理包埋

中图分类号: TS232

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)13-0326-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070160



本文网刊:

Research Progress on the Mechanism of Grain Dietary Fiber Slowing Down Starch Digestibility

GU Shaohan, SUN Binghua*, MA Sen*, WANG Xiaoxi

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Both starch and dietary fiber, which are important nutrients in cereals, and are beneficial to human health. The digestion rate and digestibility of starch are key factors affecting postprandial blood glucose in the human body. Dietary fiber, that is a nutrient content, has been not easily digested by small intestine, and has the effect of slowing down the digestion of starch, has received much attention in recent years. In this study, the effects of dietary fiber on starch digestibility have been reviewed, and the mechanisms of dietary fiber slowing down starch digestibility from three aspects: reducing amylolysis kinetics, delaying gastric emptying by viscosity of dietary fiber, physical embedding of starch by dietary fiber and wrapping starch with intact cell wall have been summarized, so as to provide a theoretical basis for the subsequent design and production of low glycemic index (GI) foods.

Key words: dietary fiber; starch; digestive characteristics; viscosity; physical embedding

随着经济的高速发展, 现代食物越来越精细化, 肥胖、高血脂和糖尿病等疾病发病率愈加突出, 已成为全球公共卫生问题^[1]。据统计, 2022 年我国患有肥胖症、糖尿病和高血脂等胰岛素代谢综合征的人

数已突破 1.4 亿, 并成为糖尿病第一大国。我国以富含淀粉(含量约为 50%~70%)的小麦、稻谷等谷物为主食, 餐后葡萄糖和胰岛素的释放会受到食物中淀粉消化速率和数量的影响。因此, 如何通过谷物类膳食

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2021YFD2100903); 河南省教育厅科技创新人才项目(23HASTIT033); 河南省科技研发计划联合基金项目(232103810069, 232103810066)。

作者简介: 谷少涵(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: 13253360412@163.com。

* 通信作者: 孙冰华(1987-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: sbhfood@126.com。

马森(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: masen@haut.edu.cn。

纤维的干预调控淀粉的消化性,例如消化速率和程度,对于预防和控制糖尿病、提升国民营养健康水平至关重要。

目前,影响淀粉消化性的因素有很多,包括淀粉的种类、精细结构(直链/支链淀粉比例、分子量、分支度)^[2]、与体系中蛋白质^[3]、多酚^[4]、膳食纤维^[5]等非淀粉组分的相互作用以及食物加工方式(蒸、煮、煎、炸、焙烤)^[6]等。其中,食物基质中的膳食纤维在减缓淀粉消化性和降低血糖生成指数方面起着非常重要的正向作用。基于此,本文重点从谷物膳食纤维的黏度降低淀粉分解动力学、延迟胃排空和膳食纤维对淀粉的物理包埋以及完整细胞壁对淀粉的包裹三个方面,归纳综述膳食纤维对淀粉消化性的调控机制,以期能够丰富创制淀粉基低血糖生成指数食物的理论基础,为糖尿病等慢性疾病的预防和调控提供新的食疗思路和产品开发途径。

1 谷物膳食纤维对淀粉消化性的影响

膳食纤维是一种不能被人体肠道消化吸收,但可以在大肠内被一些微生物分解的非淀粉多糖^[7]。谷物膳食纤维一般主要存在于谷物皮层中,含量大约在 11.6%~30.2%^[8],包括麦麸、米糠、玉米麸、燕麦麸中的膳食纤维,还有大麦、燕麦和青稞等谷物中的 β -葡聚糖。根据其能否溶于水的差异可分为不溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)^[9]。

1.1 不溶性膳食纤维对淀粉消化性的影响

不溶性膳食纤维是谷物细胞壁的主要成分,也是谷物皮层中含量最多的成分,包括纤维素、半纤维素和木质素等^[10]。麦麸作为小麦加工的主要副产物,其在全球年产量可达 2010 万吨^[11-12]。麦麸含有 37%~60% 的膳食纤维,其中不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维含量之比约为 9:1,不溶性膳食纤维是麦麸中含量最高的组分^[13]。王崇崇^[14]将从麦麸中提取的不溶性膳食纤维添加到面粉中制作馒头,添加 IDF 馒头中淀粉的快消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS)和慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)含量低于对照样品,而抗性淀粉(Resistant Starch, RS)含量高于对照样品,淀粉消化受到抑制。He 等^[15]将玉米淀粉与麦麸不溶性膳食纤维以 1:0、1:2、1:4 的比例混合,消化结果表明 IDF 能显著抑制淀粉的消化,淀粉与 IDF 比例分别为 1:2 和 1:4 时,抗性淀粉含量分别提高了 6.79% 和 11.05%。据报道,谷物麸皮中米糠品质最优^[16]。米糠不溶性膳食纤维含量达到膳食纤维总量的 90% 以上^[17]。Liu 等^[18]将不同比例的米糠不溶性膳食纤维(RBIDF)和三种主要聚合物(纤维素、木质素和半纤维素)添加到面粉中制作面条,3%~9% RBIDF 的比例下,淀粉水解率和 RDS 含量均低于对照样品,SDS 含量略有下降,RS 含量明显升高,其中添加 3% RBIDF 的样品在消化 3 h 后消化率最低,且木质素抑制淀粉消化的能力远大于

半纤维素和纤维素。综上所述,谷物麸皮中不溶性膳食纤维的添加均可以通过提高淀粉中抗性淀粉含量来减缓淀粉的消化特性。

1.2 可溶性膳食纤维对淀粉消化性的影响

1.2.1 β -葡聚糖 可溶性膳食纤维主要是果胶、 β -葡聚糖、菊粉和抗性淀粉等容易与水结合的物质^[19]。其中 β -葡聚糖广泛存在于谷物细胞壁中,如大麦、青稞和燕麦。研究发现,谷物 β -葡聚糖可在肠道内形成黏性溶液阻碍淀粉分解和葡萄糖的吸收,延缓淀粉消化和血糖浓度升高,从而有效降低餐后葡萄糖水平和胰岛素反应^[20]。可溶性膳食纤维相比不溶性膳食纤维表现出更高的黏度,可以更大程度地降低淀粉体外水解率。

Zhang 等^[21]从无壳大麦中提取纯化 β -葡聚糖,并与玉米淀粉混合,研究其对玉米淀粉体外消化的影响,发现 β -葡聚糖抑制了淀粉水解和葡萄糖扩散,且降低了 RDS 片段的百分比,增加了 SDS 和 RS 片段,减弱了玉米淀粉消化特性。Nguyen 等^[22]将不同 β -葡聚糖含量的燕麦全麦粉与小麦面粉 1:1 比例混合制作燕麦强化面条,消化实验表明 β -葡聚糖含量最高的燕麦强化面条消化率和消化速率显著低于对照的小麦粉面条,并且消化前 2 h 消化淀粉量低于对照组,食物消化前 2 h 主要代表了快速消化淀粉,说明 β -葡聚糖明显降低了燕麦强化面条的淀粉消化率。可溶性膳食纤维的黏度受分子质量影响。进一步地,Regand 等^[23]的研究证明燕麦 β -葡聚糖可以延缓淀粉消化,高分子量 β -葡聚糖燕麦麦片的 RDS 含量显著低于低分子量和对照小麦麦片,且 SDS 含量显著高于低分子量燕麦麦片。青稞中含有丰富的 β -葡聚糖,平均含量为 5%,远高于其他谷物。同样地,邓婧等^[24]为探究 β -葡聚糖在青稞淀粉体外消化性低于小麦粉中的贡献,研究了青稞 β -葡聚糖质量浓度和分子质量对青稞淀粉体外消化性的影响,发现青稞 β -葡聚糖质量浓度越高,淀粉消化越慢,分子质量越大,还原糖越少,延缓淀粉消化效果越显著。另外,李智等^[25]在此基础上对比了青稞 β -葡聚糖和黄原胶、魔芋胶、罗望子胶四种可溶性膳食纤维对玉米淀粉消化的影响效果,四种膳食纤维均能增加 SDS 和 RS 片段的比例,减少 RDS 片段的比例,并且具有浓度依赖性,相同浓度下,黄原胶抑制淀粉水解效果最好,青稞 β -葡聚糖效果最差,添加 0.1% 均能使预测血糖指数降低。以上研究表明谷物 β -葡聚糖含量和分子质量显著影响了淀粉的消化性。

1.2.2 其他可溶性膳食纤维 除了 β -葡聚糖外,其他水溶性膳食纤维也在降低淀粉消化性方面起着重要的作用。例如,张嘉茜等^[26]为了提升玉米麸皮中水溶性半纤维素在面制品中的综合利用,从玉米麸皮中提取两种不同分子量的水溶性半纤维素,研究其对小麦淀粉消化的影响,发现其均能通过降低 RDS 和 SDS 比例,增加 RS 比例来抑制淀粉消化,且 RS 比

例与分子质量及黏度呈正相关。Jia 等^[27]从绿色木霉发酵的脱脂米糠中提取的可溶性膳食纤维,具有较高的持水持油能力,探究其对饼干消化特性的影响时发现,其在一定程度上抑制淀粉的消化和水解,导致预测血糖指数显著降低,且随着添加量的增加而逐渐降低。

大体而言,如表 1 所示,膳食纤维会降低淀粉水解率,含膳食纤维饮食与不含膳食纤维饮食相比,一般是使得三种淀粉比例发生变化,比如快消化淀粉含量减少,而慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加,食物的血糖生成指数降低。但也有研究结果与此不一致,Gularte 等^[28]的研究中,部分亲水胶体增加了血糖生成指数。Chung 等^[29]的研究中,结冷胶使血糖生成指数升高 2%。亲水胶体对淀粉的作用受多种因素影响,如添加浓度、淀粉结构和加工工艺等,其主要影响因素还需要更进一步研究。

2 谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展

可溶性膳食纤维(SDF),如谷物 β -葡聚糖、抗性淀粉和亲水胶体等,已被广泛研究,能够通过不同机制降低淀粉消化^[30-32]。另外,一些不溶性膳食纤维(IDF)还可以作为物理屏障或酶抑制剂限制淀粉消化^[33]。近年来研究者们提出了一些关于谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的潜在机制,包括影响人体体内消化和发酵相关激素的释放、淀粉酶活性的抑制以及

淀粉分解产物扩散的减少^[34-35]等。在这些推测机制中根本的原因是物理阻碍效应,即膳食纤维主要是通过物理阻碍淀粉和消化酶间的接触,减少酶促反应,物理阻碍主要包括膳食纤维的黏度降低淀粉分解动力学、延迟胃排空和膳食纤维对淀粉的物理包埋以及完整细胞壁对淀粉的包裹^[36]。

2.1 黏度降低淀粉分解动力学、延迟胃排空

黏度是可溶性膳食纤维主要的理化性质。研究表明,淀粉消化速率降低和葡萄糖吸收减少与 SDF 引起的上消化道黏度增加有关^[37]。黏性膳食纤维与液体混合会增稠,黏度增加,其黏度又取决于很多因素,如化学结构、化学成分、分子量和浓度^[38]。

人们普遍认为, SDF 的黏度导致食糜黏度升高,周围溶剂流动速率降低,造成一定程度的物理屏障,减少了酶向底物的扩散或限制了接触效率,导致淀粉分解动力学降低^[39]。Chen 等^[40]评估了黏性可溶性膳食纤维(黄原胶、瓜尔胶、刺槐豆胶)对初始低黏度、高黏度饮料中淀粉消化率的影响,10 min 时透析液中葡萄糖的释放量与体系黏度呈负相关,三种树胶高黏度时显著减少了葡萄糖扩散,限制了淀粉水解率,而在低黏度情况下对消化影响不大。Zhang 等^[21]从无壳大麦中提取纯化 β -葡聚糖,并与玉米淀粉混合,发现两者相互作用导致体系表观黏度增加,限制了水流动性,减少了葡萄糖向小肠微绒毛的扩散。邓婧等^[24]发现随着青稞 β -葡聚糖质量浓度和分子质量

表 1 谷物膳食纤维对淀粉消化性的影响及可能机制

Table 1 Effect and possible mechanism of grain dietary fiber on starch digestibility

膳食纤维种类	淀粉种类	处理	淀粉消化影响结果	可能机制	参考文献
麦麸不溶性膳食纤维	小麦淀粉	麦麸不溶性膳食纤维按照比例添加到面粉中制作馒头	RDS和SDS含量降低,RS含量升高	IDF降低了水的流动性,阻碍淀粉与酶接触	[14]
米糠不溶性膳食纤维(RBIDF)	大米淀粉	米糠不溶性膳食纤维按照3%~12%的比例添加到米粉中制成即食米粉	3%~9%的RBIDF显著延缓了淀粉体外消化水解率,RS含量升高	RBIDF吸附葡萄糖,延缓葡萄糖扩散;包裹淀粉,影响游离葡萄糖释放;淀粉相对结晶度增加	[18]
无壳大麦中提取的 β -葡聚糖(HBBG)	玉米淀粉	0、2%、3%的HBBG与1 g玉米淀粉混合	水解率降低,RDS百分比降低,SDS、RS增加	β -葡聚糖链通过氢键形成聚集体,提高了食糜表观黏度,从而抑制酶水解; β -葡聚糖亲水性使之与玉米淀粉竞争水分,抑制凝胶,水迁移率降低,抑制水解	[21]
燕麦 β -葡聚糖	小麦淀粉	以燕麦全麦粉和小麦粉为原料,制作燕麦强化面条	消化率、消化速率降低	β -葡聚糖与蛋白质结合,对淀粉酶形成物理屏障	[22]
燕麦 β -葡聚糖	燕麦淀粉	不同分子量的燕麦 β -葡聚糖制作成麦片	高分子量 β -葡聚糖麦片RDS含量显著低于低分子量,SDS含量显著更高	β -葡聚糖水合作用限制淀粉水合用水;高浓度 β -葡聚糖抑制酶对部分糊化淀粉颗粒的可及性	[23]
青稞 β -葡聚糖	青稞淀粉	不同质量浓度和分子质量的青稞 β -葡聚糖添加到青稞淀粉中	消化分解生成的还原糖含量随青稞 β -葡聚糖质量浓度、分子质量增加而降低	青稞 β -葡聚糖易形成凝胶部分覆盖在淀粉颗粒表面,阻碍淀粉酶与淀粉接触;分子质量越大,溶液黏度越高,阻力越大	[24]
四种可溶性膳食纤维(青稞 β -葡聚糖、黄原胶、魔芋胶、罗望子胶)	玉米淀粉	不同浓度的四种膳食纤维分别添加到玉米淀粉中	水解度下降,RDS片段含量降低,SDS、RS含量增加,并且具有浓度依赖性,pGI降低	消化液体系数黏度增加,并且膳食纤维与淀粉分子相互缠绕,阻碍消化酶与淀粉接触,从而干预淀粉消化	[25]
玉米麸皮中水溶性半纤维素(CBH)	小麦淀粉	不同浓度的两种不同分子质量CBH分别添加到小麦淀粉中	RDS、SDS比例下降,RS比例升高	CBH表观粘度和RS比例显著正相关	[26]
脱脂米糠(DRB)中可溶性膳食纤维	小麦淀粉	不同含量的绿色木霉发酵获得的脱脂米糠中可溶性膳食纤维(F-SDF)添加到低筋面粉中制备饼干	pGI随添加量增加显著降低	SDF增加基质黏度,有助于凝胶形成,延长营养物质吸收时间;SDF包裹淀粉颗粒,使之不受消化酶酶解	[27]
青稞 β -葡聚糖	青稞淀粉	分别制备脱脂、脱蛋白、脱 β -葡聚糖青稞粉	消化速率、消化率明显增加,RDS含量显著增加,RS含量显著下降	蛋白质和 β -葡聚糖形成致密屏障,抑制淀粉糊化,且竞争水分子,限制消化	[48]

的增大,溶液黏弹性增大,其对 α -淀粉酶活性抑制效果越明显,因此,青稞 β -葡聚糖形成的高黏凝胶覆盖在淀粉颗粒表面,阻碍淀粉酶与淀粉颗粒接触,这是青稞全粉低淀粉消化率的潜在机理。

一般富含膳食纤维的食物膳食体积比较大,而提供的能量比同等质量的其他食物要少,因此能量密度比较小,能够增加饱腹感。而且咀嚼富含膳食纤维的食物通常需要更多的时间和精力,这使得许多的信号向大脑传递饱腹感^[41]。另外,黏性膳食纤维具有良好的持水能力,其在胃中膨胀,导致消化物黏度和体积增加,并通过物理结合阻止碳水化合物在肠道中流动,最终胃排空延迟,饱腹感增加^[42]。胃排空延迟可能是血糖反应减弱的主要机制。也有学者认为,膳食纤维增加了小肠食糜黏度,延长了小肠转运时间和营养物质的吸收率,导致水解葡萄糖的吸收受到限制,而剩余的高浓度葡萄糖限制了淀粉水解^[43],抑制淀粉的消化速度,从而增加饱腹感,可以减少淀粉类食物的摄入量。

综上所述,如图 1 所示,膳食纤维的黏度降低淀粉消化性的机制主要包括两个方面:一方面,食糜黏度增加导致肠道内溶液流动速率降低,降低了酶向淀粉扩散的速度,葡萄糖吸收也受到限制;另一方面,葡萄糖转运时间延长,导致胃排空延迟和饱腹感增加,进而减少淀粉基食物的摄入。

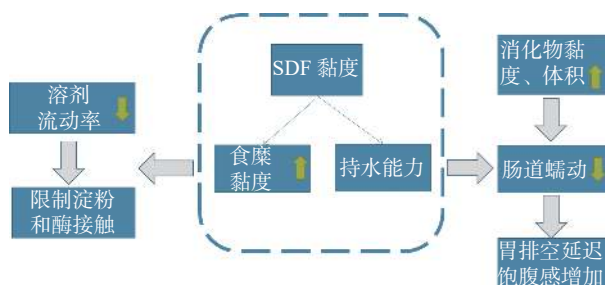


图 1 黏度降低淀粉分解动力学、延迟胃排空

Fig.1 Viscosity reduces amylolysis kinetics and delays gastric emptying

2.2 膳食纤维对淀粉的物理包埋效应

物理包埋效应涉及膳食纤维-淀粉相互作用和封装机制。膳食纤维和淀粉之间通过非共价键(如氢键、范德华力和静电吸引)相互作用,增强了分子链之间的纠缠和重叠,从而影响淀粉的糊化或形成更致密有序的凝胶网络^[21]。膳食纤维中多糖羟基和水之间质子交换或 β -葡聚糖水合作用,与淀粉竞争水分,限制淀粉的糊化,降低食物基质的消化率^[44]。另外,膳食纤维包埋淀粉,一定程度上增强了淀粉的结构,保持了其结晶度。淀粉的结晶性可以通过掩盖酶位点并阻断其与酶的接触来促进淀粉对酶水解的抗性,因此对淀粉消化起到了间接影响^[45]。一项研究中魔芋葡甘露聚糖增加了淀粉的短程有序结构,而黄原胶提高了其相对结晶度^[31]。另一项研究发现,低浓度瓜尔胶显著维持了莲子淀粉凝胶的结晶度和短程有序

结构,而较高浓度的瓜尔胶则削弱了结晶度,增加了膨胀力和 RS 含量^[46]。Liu 等^[18]的实验表明米糠不溶性膳食纤维的加入改变了淀粉结晶结构的衍射峰峰值,显著提高了相对结晶度。具有高黏度的膳食纤维往往具有成膜或涂层特性,填充淀粉颗粒间空隙或成为它们的涂层,抑制直链淀粉浸出,保护淀粉颗粒不被糊化^[47]。此外,膳食纤维与其他大分子间的相互作用也会对淀粉形成物理包埋效应。例如,Nguyen 等^[22]的研究发现,燕麦 β -葡聚糖和蛋白质之间相互作用导致燕麦强化面条的蛋白质纤维基质结合紧密,对淀粉消化酶起到了物理屏障作用,从而降低了淀粉消化率。杨月月^[48]通过脱除非淀粉组分揭示了青稞中蛋白质和 β -葡聚糖在抑制淀粉消化中起着决定作用,且其通过在淀粉颗粒表面形成致密连续的基质以抵抗淀粉酶渗透。

总而言之,如图 2 所示,物理包埋效应可分为四个方面:膳食纤维通过非共价键与淀粉分子纠缠重叠,限制淀粉凝胶糊化,增加抗性淀粉比例;膳食纤维限制淀粉糊化,进而不完全糊化的淀粉保持了相对结晶度和短程有序结构,不利于消化;高黏度的膳食纤维填充淀粉颗粒间隙或形成涂层覆盖在表面,防止其消化;膳食纤维与蛋白质共同形成紧密的基质包裹在淀粉周围。

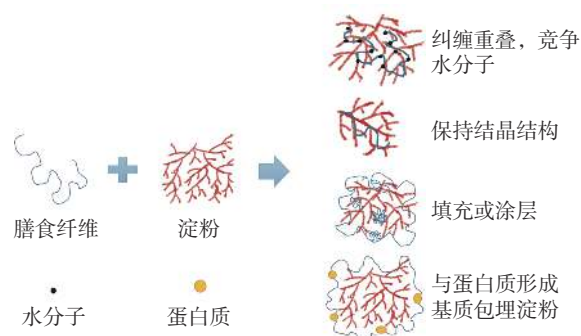


图 2 膳食纤维的物理包埋效应减缓淀粉的消化性

Fig.2 Physical embedding effect of dietary fiber slows the digestibility of starch

2.3 膳食纤维组成的细胞壁对淀粉的包裹

植物细胞壁是纤维素为骨架核心与凝胶基质组成的包膜,凝胶基质包含几种多糖(果胶、 β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖和木聚糖)、木质素和酚类物质。它是植物性食物的主要的膳食纤维来源,也是保护细胞的第一道屏障^[49]。通常在谷物加工过程中,为了提高食物适口性,细胞壁总是被破坏或去除。经过加工过的谷物几乎是纯胚乳粉,即淀粉和蛋白质的混合物,营养成分单一,膳食纤维含量极少^[50]。实际上,膳食纤维组成的细胞壁结构作为天然的物理屏障,限制了淀粉与消化酶的接触,也限制了淀粉颗粒的膨胀和暴露,进而使其难以糊化,淀粉消化性有所降低。

完整的细胞壁对淀粉颗粒的包裹也是降低淀粉消化率的限制因素。完整的细胞壁通过屏障特性限制烹饪过程中的淀粉糊化和 α -淀粉酶的非特异性结

合调节淀粉的生物利用^[51]。全谷物细胞壁完全包裹胚乳中的淀粉,避免其接触消化酶,并且限制了淀粉颗粒的膨胀和浸出,起到了屏障作用^[52]。从小麦和高粱等谷物中分离出单个完整的细胞结构,与被破坏的细胞相比,淀粉消化程度显著降低,并且显微观察结果表明细胞壁是阻止淀粉酶进入的有效屏障,煮熟的完整细胞内仍存在不完全糊化的淀粉,证明细胞内的淀粉颗粒膨胀受限^[53]。

此外最近的一项研究表明,对于某些谷物,如小米,完整的籽粒结构(细胞完整性)才是其 β -葡聚糖缓慢降糖作用的主要原因^[54]。因为, β -葡聚糖产生的黏度远远低于淀粉产生的黏度,细胞壁中的淀粉主要因细胞壁的包裹可以避免被消化,但当细胞壁破裂时,对淀粉的保护作用就消失了^[55]。但是,这一假设还没有得到很好的验证。

3 总结与展望

膳食纤维和淀粉都是谷物中重要的营养物质,通过膳食纤维调节淀粉消化,进而生产低血糖生成指数的食品,对于预防慢性疾病具有至关重要的作用。近年来,大量研究致力于阐明膳食纤维降低淀粉消化性的潜在机制,黏度效应、物理包埋和细胞壁完整性起着关键作用。黏度增加限制酶向淀粉扩散速度,限制葡萄糖扩散,延长转运时间,延缓胃排空,增加饱腹感;膳食纤维与淀粉竞争吸水,限制其糊化,保持结晶结构,填充淀粉孔隙或涂层,包埋淀粉;细胞壁充当物理屏障和天然胶囊,保护淀粉不被酶解,使之成为不可接触的淀粉。然而,考虑到分离的谷物细胞的脆弱,需要通过进一步的研究来了解完整细胞在胃肠道运输中的相对完整性。另外,膳食纤维可能直接参与抑制淀粉酶活性而影响淀粉消化,也可能与内源性蛋白质相互作用,目前相关研究也相对较少。总之,通过更加深入更加系统的研究方法,比如结合生物学、口腔医学和临床医学,而不是体外消化模型,继续揭示膳食纤维、淀粉和消化酶间的相互作用机理,对开发新型健康食品具有参考意义。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] TAYLOR J R N, EMMAMBUX M N, KRUGER J. Developments in modulating glycaemic response in starchy cereal foods[J]. *Starch-Starke*, 2015, 67(1-2): 79-89.
- [2] KOROMPOKIS K, VERBEKE K, DELCOUR J A. Structural factors governing starch digestion and glycemic responses and how they can be modified by enzymatic approaches: A review and a guide[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(6): 5965-5991.
- [3] YE J, HU X, LUO S, et al. Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice flour[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 404-409.

- [4] 邓楠, 杨正香, 刘成梅, 等. 大米淀粉-多酚复合物的制备与消化特性研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(11): 57-63.
- [5] DENG N, YANG Z X, LIU C M, et al. Preparation and digestibility of rice starch-polyphenol complex[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(11): 57-63.
- [6] LIN S, JIN X, GAO J, et al. Impact of wheat bran micronization on dough properties and bread quality: Part II-quality, antioxidant and nutritional properties of bread[J]. *Food Chemistry*, 2022, 396: 133631.
- [7] 张卓琼, 郭军. 低血糖生成指数食品研究与开发应用现状[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(1): 313-320.
- [8] ZHANG Z Q, GUO J. Research development and application status of low glycemic index foods[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(1): 313-320.
- [9] 田心怡, 吴娜娜, 杨积鹏, 等. 谷物膳食纤维改性方法及其在食品中的应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(1): 194-202.
- [10] TIAN X Y, WU N N, YANG J P, et al. Research progress on modification methods of cereal dietary fiber and their application in food industry[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(1): 194-202.
- [11] 尚珊, 臧梁, 傅宝尚, 等. 全谷物原料的营养特性及食品开发研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 443-452.
- [12] SHANG S, ZANG L, FU B S, et al. Nutritional characteristics of whole grain and product development progress[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 443-452.
- [13] 杨统帅, 黄继红, 张文占, 等. 麦麸膳食纤维的制备及应用现状——在蒸煮面制品中的研究进展[J]. *粮食加工*, 2021, 46(1): 15-21.
- [14] YANG T S, HUANG J H, ZHANG W Z, et al. Preparation and application of wheat bran dietary fiber—flour products application of wheat bran dietary fiber[J]. *Grain Processing*, 2021, 46(1): 15-21.
- [15] 李琦, 曾凡坤, 华蓉, 等. 麦麸膳食纤维理化特性、制备方法及应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(17): 352-357, 367.
- [16] LI Q, ZENG F K, HUA R, et al. Research progress on the physicochemical properties, preparation methods and application of wheat bran dietary fiber[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(17): 352-357, 367.
- [17] PYCARELLE S C, WINNEN K L J, BOSMANS G M, et al. Wheat (*Triticum aestivum* L.) flour free lipid fractions negatively impact the quality of sponge cake[J]. *Food Chemistry*, 2019, 271: 401-409.
- [18] 李建科, 孟永宏, 刘柳, 等. 我国食品工业副产物资源化利用现状[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(6): 1-13.
- [19] LI J K, MENG Y H, LIU L, et al. Utilization of food industry by-products in China[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(6): 1-13.
- [20] HAN W, MA S, LI L, et al. Application and development prospects of dietary fibers in flour products[J]. *Journal of Chemistry*, 2017, 2017: 2163218.
- [21] 王崇崇. 膳食纤维和阿魏酸对馒头品质及淀粉消化性的影响机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [22] WANG C C. Effect mechanism of dietary fiber and ferulic acid on steamed bread quality and starch digestion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [23] HE T, ZHANG X, ZHAO L, et al. Insoluble dietary fiber from wheat bran retards starch digestion by reducing the activity of alpha-amylase[J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136624.
- [24] PRADEEP P M, JAYADEEP A, GUHA M, et al. Hydrothermal and biotechnological treatments on nutraceutical content and antioxidant activity of rice bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60

- (1): 187–192.
- [17] QIAO C C, ZENG F K, WU N N, et al. Functional, physico-chemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107057.
- [18] LIU T, WANG K, XUE W, et al. *In vitro* starch digestibility, edible quality and microstructure of instant rice noodles enriched with rice bran insoluble dietary fiber[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 142: 111008.
- [19] BAI J, LI Y, LI T, et al. Comparison of different soluble dietary fibers during the *in vitro* fermentation process[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(26): 7446–7457.
- [20] DAOU C, ZHANG H. Oat beta-glucan: Its role in health promotion and prevention of diseases[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2012, 11(4): 355–365.
- [21] ZHANG H, LI Z, TIAN Y, et al. Interaction between barley beta-glucan and corn starch and its effects on the *in vitro* digestion of starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141: 240–246.
- [22] NGUYEN T T L, FLANAGAN B M, TAO K, et al. Effect of processing on the solubility and molecular size of oat beta-glucan and consequences for starch digestibility of oat-fortified noodles[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131291.
- [23] REGAND A, CHOWDHURY Z, TOSH S M, et al. The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 297–304.
- [24] 邓婧, 马小涵, 赵天天, 等. 青稞 β -葡聚糖对淀粉体外消化性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 106–111. [DENG J, MA X H, ZHAO T T, et al. Effect of highland barley β -glucan on starch digestibility *in vitro* [J]. *Food Science*, 2018, 39(10): 106–111.]
- [25] 李智, 艾连中, 丁文字, 等. 可溶性膳食纤维对玉米淀粉体外消化的抑制作用[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 1–6, 12. [LI Z, AI L Z, DING W Y, et al. Inhibitory effects of soluble dietary fibers on the *in vitro* digestion of corn starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 1–6, 12.]
- [26] 张嘉茜, 刘思源, 王鹏杰, 等. 两种分子质量水溶性半纤维素的制备及其对淀粉消化抑制作用研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(9): 150–157. [ZHANG J Q, LIU S Y, WANG P J, et al. Preparation of two molecular weight water-soluble hemicelluloses and its inhibition on starch digestion[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 150–157.]
- [27] JIA M, YU Q, CHEN J, et al. Physical quality and *in vitro* starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105349.
- [28] GULARTE M A, ROSELL C M. Physicochemical properties and enzymatic hydrolysis of different starches in the presence of hydrocolloids[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 85(1): 237–244.
- [29] CHUNG H J, LIU Q, LIM S T. Texture and *in vitro* digestibility of white rice cooked with hydrocolloids[J]. *Cereal Chemistry*, 2007, 84(3): 246–249.
- [30] ZHANG H, LI Z, ZHANG L, et al. Effects of soluble dietary fibers on the viscosity property and digestion kinetics of corn starch digesta[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127825.
- [31] ZHENG J, HUANG S, ZHAO R, et al. Effect of four viscous soluble dietary fibers on the physicochemical, structural properties, and *in vitro* digestibility of rice starch: A comparison study[J]. *Food Chemistry*, 2021, 362: 130181.
- [32] HUANG Z, WANG J J, CHEN Y, et al. Effect of water-soluble dietary fiber resistant dextrin on flour and bread qualities[J]. *Food Chemistry*, 2020, 317: 126452.
- [33] LI Y, LIANG W, HUANG W, et al. Complexation between burdock holocellulose nanocrystals and corn starch: Gelatinization properties, microstructure, and digestibility *in vitro* [J]. *Food & Function*, 2022, 13(2): 548–560.
- [34] GOFF H D, REPIN N, FABEK H, et al. Dietary fibre for glycaemia control: Towards a mechanistic understanding[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2018, 14: 39–53.
- [35] QI X, AL-GHAZZEWI F H, TESTER R F. Dietary fiber, gastric emptying, and carbohydrate digestion: A mini-review[J]. *Starch-Stärke*, 2018, 70(9-10): 1700346.
- [36] ZHANG H, SUN S, AI L. Physical barrier effects of dietary fibers on lowering starch digestibility[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 48: 100940.
- [37] DIKEMAN C L, FAHEY G C. Viscosity as related to dietary fiber: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2006, 46(8): 649–663.
- [38] KRISTENSEN M, JENSEN M G. Dietary fibres in the regulation of appetite and food intake. Importance of viscosity[J]. *Appetite*, 2011, 56(1): 65–70.
- [39] REPIN N, CUI S W, GOFF H D. Impact of dietary fibre on *in vitro* digestibility of modified tapioca starch: Viscosity effect[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2018, 15: 2–11.
- [40] CHEN M, GUO L, NSOR-ATINDANA J, et al. The effect of viscous soluble dietary fiber on nutrient digestion and metabolic responses I : *In vitro* digestion process[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105791.
- [41] BLUNDELL J E, HALFORD J C. Regulation of nutrient supply: The brain and appetite control[J]. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 1994, 53(2): 407–418.
- [42] THONDRE P S, SHAFAT A, CLEGG M E. Molecular weight of barley beta-glucan influences energy expenditure, gastric emptying and glycaemic response in human subjects[J]. *British Journal of Nutrition*, 2013, 110(12): 2173–2179.
- [43] LI C, YU W, WU P, et al. Current *in vitro* digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 96: 114–126.
- [44] BANCHATHANAKIJ R, SUPHANTHARIKA M. Effect of different β -glucans on the gelatinisation and retrogradation of rice starch[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(1): 5–14.
- [45] LIU C, WANG S, COPELAND L, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starches from field peas grown in China[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 829–836.
- [46] ZHENG M, YOU Q, LIN Y, et al. Effect of guar gum on the physicochemical properties and *in vitro* digestibility of lotus seed starch[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 286–291.
- [47] NING Y, CUI B, YUAN C, et al. Effects of konjac glucomannan on the rheological, microstructure and digestibility properties of debranched corn starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105342.
- [48] 杨月月. 内源性非淀粉组分对青稞中淀粉消化性的影响机制研究及应用[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [YANG Y Y. Research on the mechanism and application of endogenous non-starch constituents on digestibility of starch in highland barley[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [49] LIU X, LE BOURVELLEC C, RENARD C. Interactions be-

tween cell wall polysaccharides and polyphenols: Effect of molecular internal structure[J]. [Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety](#), 2020, 19(6): 3574–3617.

[50] DOBLADO-MALDONADO A F, PIKE O A, SWELEY J C, et al. Key issues and challenges in whole wheat flour milling and storage[J]. [Journal of Cereal Science](#), 2012, 56(2): 119–126.

[51] BHATTARAI R R, DHITAL S, WU P, et al. Digestion of isolated legume cells in a stomach-duodenum model: Three mechanisms limit starch and protein hydrolysis[J]. [Food & Function](#), 2017, 8(7): 2573–2582.

[52] JUNEJO S A, DING L, FU X, et al. Pea cell wall integrity controls the starch and protein digestion properties in the INFO-

GEST *in vitro* simulation[J]. [International Journal of Biological Macromolecules](#), 2021, 182: 1200–1207.

[53] BHATTARAI R R, DHITAL S, MENSE A, et al. Intact cellular structure in cereal endosperm limits starch digestion *in vitro* [J]. [Food Hydrocolloids](#), 2018, 81: 139–148.

[54] MONDAL D, AWANA M, AGGARWAL S, et al. Microstructure, matrix interactions, and molecular structure are the key determinants of inherent glycemic potential in pearl millet (*Pennisetum glaucum*) [J]. [Food Hydrocolloids](#), 2022, 127: 107481.

[55] CHEN X, ZHANG H, ZHU L, et al. Effects of structural barriers on digestive properties of highland barley as compared with unpolished rice and oats[J]. [Food Bioscience](#), 2022, 50: 102089.