

doi:10.12031/spxb202300583

文章编号:2095-6002(2023)06-0001-08

引用格式:金征宇,程昊,陈龙.功能性碳水化合物研究进展[J].食品科学技术学报,2023,41(6):1-8.



JIN Zhengyu, CHENG Hao, CHEN Long. Research progress on functional carbohydrates[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(6): 1-8.

功能性碳水化合物研究进展

金征宇, 程昊, 陈龙

(江南大学食品学院/食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:碳水化合物在自然界中广泛存在,主要来源于植物、动物、微生物。碳水化合物一般被分为4类:单糖、双糖、寡糖和多糖。碳水化合物是人体必需的三大营养素之一,最基本的生理功能是为人的生命活动提供能量。但是,随着近年来全球社会经济的快速发展,人们健康意识逐渐增强。大家对碳水化合物摄入有了新的需求,具备各种功能的碳水化合物成为人们研究的热点。同时,越来越多的功能性碳水化合物被人类发现并应用在食品中。功能性碳水化合物主要分为膳食纤维、抗性淀粉、抗性糊精、活性多糖、功能性低聚糖、糖醇等代糖。功能性碳水化合物具有与人体健康密切相关的多种生理功能,在提供能量、构成机体成分、调节蛋白质代谢、抗生酮、保护肝脏以及调节肠道菌群等方面发挥着重要的作用。阐述了碳水化合物的生理功能及常见功能性碳水化合物的研究进展,并展望了功能性碳水化合物的未来发展趋势。希望可以以此丰富人们对功能性碳水化合物的科学认识,为功能性碳水化合物的深入研究及相关食品开发提供理论参考。

关键词:碳水化合物;功能性;抗性淀粉;抗性糊精;功能性低聚糖

中图分类号: TS202.1

文献标志码: A

碳水化合物是人类最主要的能量来源,又是人类生存的最基本物质和最重要的食物能源。碳水化合物不仅是食物中含量最高的成分,也是人类七大营养素之一,广泛存在于谷物、豆类和水果中。据报道,膳食碳水化合物占人类饮食中能量来源的一半以上。特别是我国以淀粉类食物为主食,人体总能量中60%~70%来自食物中的碳水化合物。碳水化合物根据其聚合度可分为单糖(monosaccharide)、双糖(disaccharide)、寡糖(oligosaccharide)和多糖(polysaccharide);根据其生理利用度可分为可消化利用的碳水化合物和不可消化利用的碳水化合物。

碳水化合物具有与人体健康密切相关的多种功能,包括贮存和提供能量、构成机体的成分、调节蛋白质代谢、抗生酮、保护肝脏、调节肠道菌群等,这些功能对人类非常重要。随着近年来全球社会经济的快速发展,人们健康意识逐渐增强。大家对碳水化合物摄入有了新的需求,具备各种功能的功能性碳水化合物成为人们研究的热点。膳食纤维、抗性淀粉、活性多糖、功能性低聚糖以及糖醇等功能性碳水化合物的多功能性引起了广泛的关注。膳食纤维被称为第七大营养素,虽不能被人体消化但能够通过促进肠道的蠕动来改善便秘以及调节肠道菌群。抗性淀粉和抗性糊精不

收稿日期:2023-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32130084;32101990;32372475);江苏省自然科学基金资助项目(BK20200617);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_2516)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China (32130084; 32101990; 32372475); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20200617); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX23_2516).

第一作者:金征宇,男,教授,博士,博士生导师,主要从事碳水化合物资源开发与利用方面的研究。

仅可以通过调节脂质的代谢降低血脂,还能够促进矿物质的吸收。活性多糖主要是从天然物质中提取而来,但它们具有相似的功能性,例如抗肿瘤、抗病毒、增强免疫力、抗菌、抗氧化活性等。糖醇在食品中应用广泛,主要被用来替代蔗糖。本文对碳水化合物的基本生理功能以及一些重要的功能性碳水化合物的研究进展进行介绍,并对一

些新型功能性碳水化合物的未来发展趋势进行展望,以期对功能性碳水化合物的深入研究及食品开发提供参考。

1 碳水化合物的生理功能

碳水化合物主要有 6 方面的生理功能,见图 1。

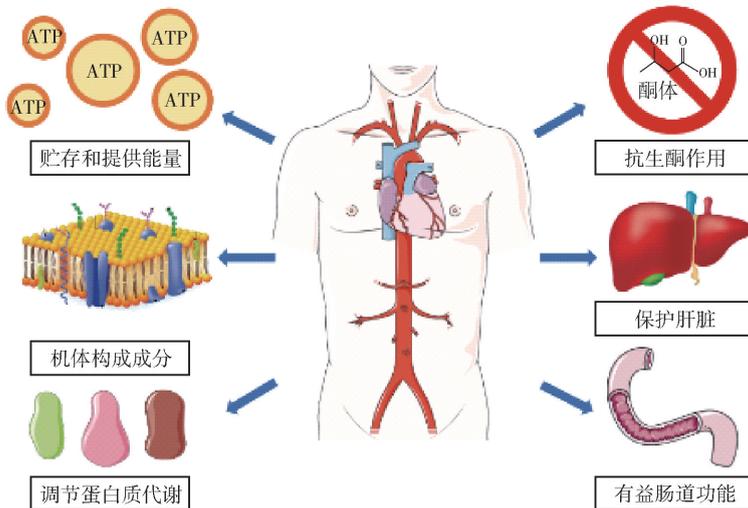


图 1 碳水化合物的主要生理功能

Fig. 1 Main physiological function of carbohydrates

1.1 贮存和提供能量

碳水化合物是人类获取能量最经济和最主要的来源。食物中的大多数碳水化合物被人体摄入后,可在人体内被消化酶分解后被胃和小肠吸收,最终以葡萄糖的形式进入血液,为人体供能。所有的碳水化合物在体内消化后,主要以葡萄糖的形式被吸收,每克葡萄糖可以产生 16.7 kJ (4 kcal) 的能量。人体内作为能源的碳水化合物主要是糖原和葡萄糖,由于人体内储存的糖原很少,其储备的能量仅供半天消耗,所以人们每天必须摄入足够量的碳水化合物,才能保证人体能量的需要。

1.2 构成机体的成分

碳水化合物也是构成人类机体成分的重要物质。比如,碳水化合物与脂类形成的糖脂是组成细胞膜与神经组织的重要成分^[1];糖类与蛋白质结合生成的糖蛋白是构成软骨、骨骼和眼球的角膜、玻璃体的组成成分^[2];糖和磷酸、碱基组成的核糖核酸和脱氧核糖核酸是构成细胞质和细胞核的重要成分。此外,人体的大脑和红细胞必须依靠血糖供给能量,因此维持神经系统和红细胞的正常功能也需要糖^[3]。

1.3 调节蛋白质代谢

碳水化合物还可以帮助调节人体蛋白质代谢。摄入充足的碳水化合物可使人体满足能量需要,防止消耗大量蛋白质用作能量。此外,蛋白质被认为是支持碳水化合物和脂肪代谢的辅助能量来源,当人体同时摄入碳水化合物与蛋白质时,体内储存的氮比单独摄入蛋白质时多,可增加机体 ATP 的合成,有利于氨基酸的活化与合成蛋白质^[4]。

1.4 抗生酮

碳水化合物也与人体脂质代谢有关。碳水化合物作为人体的主要供能物质,当饮食中碳水化合物摄入量不足时,为保证人体所需的能量供给,体内脂肪会加速分解为脂肪酸,给人体供给能量。但是在这一代谢过程中,脂肪酸会因为不能彻底氧化而产生过多的酮体(如乙酰乙酸、丙酮和 β -羟基丁酸等),过多酮体的积累将导致人体酮酸中毒。因此,充足的膳食碳水化合物摄入还可起到抗生酮的作用。

1.5 保护肝脏

碳水化合物还具有保护肝脏的作用。肝脏对人体具有重要的解毒作用,碳水化合物和肝脏的

解毒作用有关。肝素是一种线性硫酸化多糖,广泛分布于动物组织中,当人体摄入碳水化合物充足时,有利于肝素的合成^[5]。肝素具有抗炎作用^[6],因此肝脏对细菌感染所引起的毒血症具有一定的解毒作用。此外,肝素还具有抗凝血特性以及良好的生物相容性^[7]。因此,摄入足量的碳水化合物,可以对人体肝脏起到保护作用,有利于身体的健康。

1.6 有益肠道功能

碳水化合物对人体肠道也具有有益作用。一些不易消化的碳水化合物(如膳食纤维等)虽然不能被人体消化吸收,但是它们可以刺激肠道蠕动,有助于正常的消化和排便,进而减少细菌及其毒素对

肠壁的刺激,减轻肠道炎症^[8]。此外,某些寡糖(如甘露寡糖、低聚果糖等)进入人体后,能与肠道中的致病菌结合,使其无法在肠壁表面定植,随食糜排出体外,从而保护人体免遭这些致病菌的侵害^[9]。在胃肠道内,一些寡糖还可以选择性地作为细菌生长的底物。比如,低聚果糖能够作为乳酸杆菌和双歧杆菌生长的底物^[10],但沙门氏菌、大肠埃希氏菌和其他革兰氏阴性菌对其的利用效率很低,进而使得这些有害细菌的生长受到抑制。

2 功能性碳水化合物的分类

功能性碳水化合物主要有6大类,见图2。

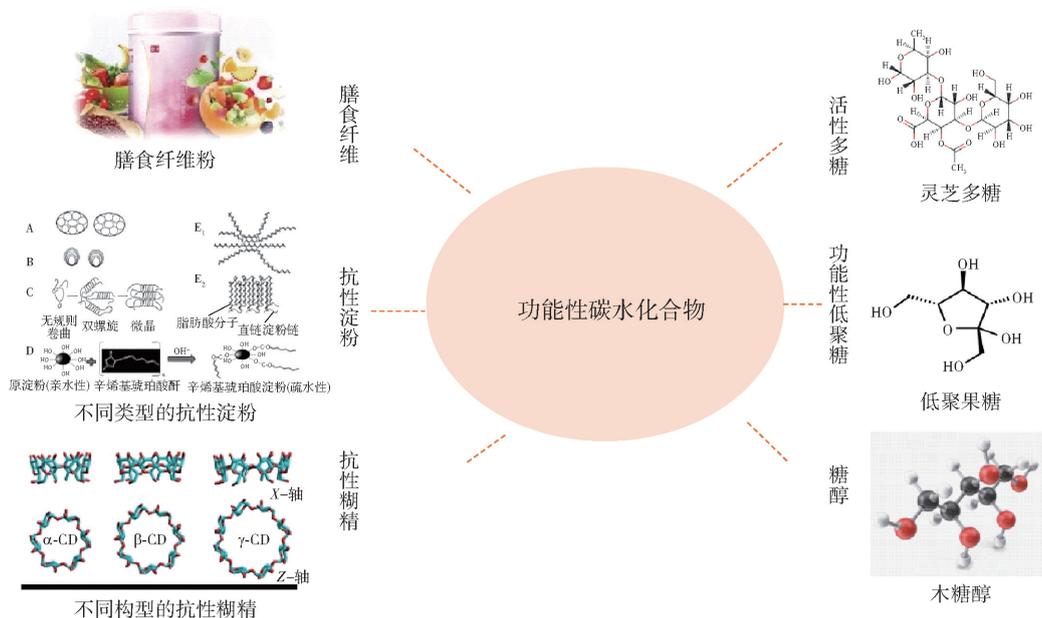


图2 功能性碳水化合物的类型及示例

Fig. 2 Types and examples of functional carbohydrates

2.1 膳食纤维

2004年,国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)形成了关于膳食纤维的定义草案,膳食纤维被定义为:小肠内不能消化吸收,聚合度不小于3的碳水化合物聚合物。膳食纤维按照溶解度可分为:可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不可溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)。膳食纤维具有多种对人体有益的健康生理功能,包括调节血糖、降低胆固醇、维护肠道健康和保护心血管等。研究表明,膳食纤维摄入量与糖尿病发病率呈现负相关,摄入膳食纤维含量越高,患糖尿病概率越低^[11]。宋华等^[12]通过研究在小麦淀

粉中添加羧甲基纤维素、大豆膳食纤维和魔芋精粉等不同种类膳食纤维对II型糖尿病患者餐后血糖增值的影响发现,与空白对照(摄入小麦淀粉)相比,随着小麦淀粉中膳食纤维添加量的增加,摄入小麦淀粉餐后血糖增值下降。此外,摄入膳食纤维还可以降低人体对脂肪的消化吸收作用,使机体血脂水平降低。吕梅霞等^[13]通过对比不同剂量含鹰嘴豆膳食纤维的高脂饲料饲养对高脂血症模型SD大鼠血脂水平的影响发现,鹰嘴豆膳食纤维摄入可以降低高脂血症大鼠的血脂水平。同时,膳食纤维还可以增强肠道蠕动,调节肠道菌群。通过补充菊粉可以诱导人体肠道微生物丰度变化,在一定程度上改

善便秘^[14]。

2.2 抗性淀粉

抗性淀粉是指不能在小肠中消化和吸收,但可以在大肠中发酵并产生短链脂肪酸的淀粉及其降解产物,属于膳食纤维中的一种^[15]。抗性淀粉根据其结构特征可分为5种类型(表1),分别为RS1、RS2、RS3、RS4和RS5^[15-16]。RS1是指通过物理保护结构阻止消化酶对淀粉的可及性,进而难以消化的淀粉。RS2指具有B-或C-型晶体结构的颗粒状淀粉。RS3是指糊化后淀粉冷却回生过程中直链淀粉分子转化为双螺旋线性结构的淀粉。RS4是指经过交联、酯化、磷酸化等化学改性的淀粉。RS5是指淀粉中直链淀粉和与脂质相互作用形成的直链淀粉-脂质复合物。抗性淀粉具有多种健康生理功能,包括调节血糖和脂质代谢、促进肠道功能、防治直肠癌等作用^[15]。据报道,连续摄入含抗性淀粉的松饼可以刺激成人饱腹感并稳定血糖水平^[17]。而且,抗性淀粉还可以增加大鼠盲肠消化物中的短链脂肪酸含量,说明其具有调节脂质代谢的作用^[18]。也有研究表明,抗性淀粉发酵产生的短链脂肪酸可以降低结肠中的pH值,进而起到加速矿物元素转化为易于吸收的可溶性离子的作用,促进矿物质吸收^[19]。此外,研究还证实,抗性淀粉的摄入可以有效抑制偶氮甲烷诱导的大鼠结肠癌前病变^[20]。

表1 抗性淀粉的分类、定义及举例

Tab.1 Classification, definition, and examples of resistant starch

| 分类 | 定义 | 举例 |
|-----|-----------------|---------------------|
| RS1 | 物理包埋的淀粉颗粒 | 碾碎的谷物、种子、豆类 |
| RS2 | 具有B-或C-型晶体结构的淀粉 | 高直链淀粉:玉米、生马铃薯、生香蕉淀粉 |
| RS3 | 回生重结晶的淀粉 | 熟食和冷藏食品(土豆、意大利面、米饭) |
| RS4 | 化学改性的淀粉 | 交联淀粉和辛烯基琥珀酸酯淀粉 |
| RS5 | 直链淀粉-脂质复合物 | 高直链淀粉与硬脂酸复合物 |

2.3 抗性糊精

抗性糊精是由淀粉酸化和酶解产生的SDF,其通过糊精化过程的高度受控的部分水解和再聚合,经部分降解及糖基化转移形成。抗性糊精具有调节血糖、降低血脂、疏通肠道、促进矿物质吸收等生理

功能和良好的加工稳定性,是理想的功能性食品原料。2012年卫生部第16号公告将抗性糊精列为普通食品,扩大了抗性糊精在食品行业中的应用范围。研究表明,通过连续喂食抗性麦芽糊精可以增加大鼠体内胰高血糖素样肽(GLP-1)的分泌,起到降低血糖的作用,这表明抗性糊精有助于改善葡萄糖不耐受^[21]。同时,抗性麦芽糊精还可以通过在脂质吸收过程中延缓脂肪酸从胶束中的释放来抑制脂质吸收并促进脂质排泄到粪便中^[22]。一项随机对照临床研究显示,连续摄入抗性糊精可以改善受试者的粪便稠度,增加粪便量并改善肠道功能^[23]。

2.4 活性多糖

活性多糖是指具有免疫调节、促进肠胃功能、抗氧化、抗肿瘤等特殊生理功能的多糖,广泛存在于植物、动物、微生物(细菌和真菌)和海藻中。根据多糖的原料来源,可将其分为植物多糖、动物多糖、食用菌多糖、微生物多糖及海洋生物多糖等。其中,植物多糖是植物细胞代谢产生的聚合度超过10的聚糖。近年来,从铁皮石斛、黄芪、当归、党参、枸杞等药食同源植物中提取的多糖由于被认为具有抗肿瘤、抗病毒、免疫增强等潜在的功效而被广泛研究。动物实验表明灵芝多糖可以抑制肺癌肿瘤生长和转移,诱导体内肿瘤细胞凋亡^[24]。枸杞多糖还可以通过改变肠道微生物群和抑制小鼠炎症来改善过敏性哮喘^[25]。此外,黄芪多糖被认为可能通过抑制炎症和减少氧化应激来缓解溃疡性结肠炎^[26]。食用菌由于其独特的风味和感官特性受到人们的关注。研究表明,食用菌多糖具有免疫调节、抗菌、抗氧化、抗癌和抗肿瘤等功能特性^[27]。Pattanayak等^[28]通过对一种从可食用野生香菇中提取的香菇多糖进行表征发现,该多糖具有DPPH自由基清除活性和羟基自由基清除活性,表明其具有一定的抗氧化活性。此外,也有研究表明从可食用菌中提取的蘑菇多糖具有抗肿瘤和免疫刺激活性^[29]。随着人们对活性多糖的深入研究,生产周期短、产率高、提取简单的微生物多糖也成了活性多糖的重要来源之一。微生物细胞的结构和组成相对简单,其细胞成分与多糖的交联度低,这使得微生物多糖的纯化过程容易,生产效率较高^[30]。而且,不同的微生物多糖也具有不同的生物活性。从植物乳杆菌发酵的石冈菌中纯化的多糖具有抗辐射和抗氧化作用,是潜在的功能食品成分^[31]。此外,红海藻多糖也被认为具有

调节免疫、促进肠道、抵抗肥胖、抗氧化和抗癌等生理功能^[32]。

2.5 功能性低聚糖

功能性低聚糖是指由2~10个相同或不同的单糖以糖苷键聚合而成,具有糖类某些共同的特性,可直接代替蔗糖作为甜食配料,但不被人体胃酸、胃酶降解的糖。常见的功能性低聚糖包括低聚异麦芽糖、低聚半乳糖、低聚果糖、低聚乳果糖、乳酮糖、大豆低聚糖、低聚木糖、帕拉金糖、耦合果糖、低聚龙胆糖等。功能性低聚糖被认为可以特异性诱导肠道中双歧杆菌生长,促进双歧杆菌发酵产生大量短链脂肪酸,并抑制有害菌生长繁殖,进而降低有害菌和毒素在肠膜的附着力。而且,功能性低聚糖还具有调节血糖、降血脂、调节脂质代谢、增强免疫力等功能^[33]。有研究表明,低聚半乳糖可以修复酒精依赖大鼠的肠道微生物群失调,恢复正常的肠道通透性,并消除血液中的内毒素^[34]。此外,短期摄入低聚果糖也被证明可以提高盲肠中免疫球蛋白浓度^[35]。临床实验还表明持续摄入低聚果糖可以增加人体早餐和晚餐后的饱腹感,减少能量摄入^[36]。除了常见的低聚糖,近年来一些新来源低聚糖也成了人们研究的热点。比如,芒果果胶低聚糖可以选择性增强结肠中双歧杆菌和乳酸杆菌的活性,使其可以作为一种用于功能性食品的新型益生元^[37]。母乳低聚糖被认为可以作为抗粘剂,防止各种病原体附着在婴儿的上皮表面,预防或减少肠道中的传染病,还可以作为抗菌剂抑制细菌增殖^[38]。这些功能性低聚糖均可作为未来健康功能食品开发潜在的食品原料。

2.6 糖醇等代糖

糖醇又称功能性糖醇,是从生物废料中发酵,或糖的醛基、酮基或半缩醛羟基被氢化还原后生成的糖类衍生物,如葡萄糖加氢还原生成山梨醇,木糖还原生成木糖醇等。糖醇根据其结构可分为单糖醇(赤藓糖醇、木糖醇、山梨糖醇、甘露糖醇等)和多糖醇(麦芽糖醇、乳糖醇等)^[39]。与蔗糖相比,糖醇具有低热量、低血糖、低胰岛素应答等特性,因此糖醇的摄入不会引起血糖水平波动,适用于糖尿病患者。而且糖醇具有较高的耐热性,也不是口腔微生物的适宜底物,不会引起牙齿龋变^[40]。此外,部分糖醇代谢类似于膳食纤维,可预防便秘、结肠癌的发生。因此,糖醇被作为新型甜味剂被广泛应用于食品工业。根据欧盟法规,有7

种糖醇被定义为营养甜味剂,即山梨糖醇(E420)、甘露糖醇(E421)、异麦芽酮糖醇(E953)、麦芽糖醇(E965)、乳糖醇(E966)、木糖醇(E967)和赤藓糖醇(E968)。但是,糖醇过量摄入时可能会引起肠胃不适或腹泻^[41]。近年来,随着人们对低热量减肥食品的追捧,糖醇作为蔗糖的替代品被添加在相关食品中。比如,赤藓糖醇由于在酸性或碱性环境中具有较高稳定性且不参与美拉德反应^[39],被广泛应用于饮料和烘焙食品中。据报道,赤藓糖醇还可以在高血糖条件下保护内皮细胞^[42]。此外,赤藓糖醇也是一种较好的自由基清除剂,具有抗氧化活性^[43]。麦芽糖醇也是一种重要的糖醇,其特征与蔗糖类似,甜味可达蔗糖的90%^[39]。除了作为甜味剂外,麦芽糖醇还可以用作脂肪替代品,因为它可以为食物提供类似奶油的质地。由于其低吸湿性和高温稳定性,它被用于许多烘焙产品以及各种低卡路里、低脂肪和无糖食品^[44]。此外,研究表明麦芽糖醇还具有一定的益生元作用,可以促进人体肠道健康^[44]。值得注意的是,虽然糖醇在食品中被广泛应用,但是关于糖醇合理摄入量及其对人体生理健康影响仍需不断深入研究。

3 功能性碳水化合物研究展望

碳水化合物作为人类在自然界中最重要的能量来源,因其所具有的多种生理功能而被广泛应用于食品工业中。随着人们生活水平的提高和健康意识的增强,功能性碳水化合物的开发和利用成了热点。与此同时,随着功能性碳水化合物研究的不断深入,人们对未来功能性碳水化合物的开发也提出了新的要求。首先是功能性碳水化合物新资源的开发与利用。要积极从植物、动物、微生物以及食品工业副产物等资源中提取功能性碳水化合物,这也符合“树立大食物观,构建多元化食物供给体系,多途径开发食物来源”的理念。其次,未来功能性碳水化合物的开发需要尽量满足不同人群(如婴幼儿、青少年、老人、糖尿病患者等)的全面营养需求。除了具备低热量、低升糖指数、免疫调节、促进肠道健康等功能外,还应该开发具有一定特殊医学功能的功能性碳水化合物,以助力我国“健康中国2030”战略的实施;此外,研究人员需要对功能性碳水化合物的安全性进行

更深入和全面的评估,明确不同类型功能性碳水化合物化合物的摄入剂量,确保人体对功能性碳水化合物化合物的安全摄入。最后,合成生物学、分子生物学和计算化学等学科的交叉融合创新也是未来实现新型功能性碳水化合物化合物开发和高效生产的重要手段。

参考文献:

- [1] STIPCEVIC T, KNIGHT C P, KIPPIN T E. Stimulation of adult neural stem cells with a novel glycolipid biosurfactant[J]. *Acta Neurologica Belgica*, 2013, 113(4): 501–506.
- [2] BROCKHAUSEN I, ANASTASSIADES T P. Inflammation and arthritis: perspectives of the glycobiochemist[J]. *Expert Review of Clinical Immunology*, 2008, 4(2): 173–191.
- [3] WATTS A G, DONOVAN C M. Sweet talk in the brain: glucosensing, neural networks, and hypoglycemic counterregulation[J]. *Frontiers in Neuroendocrinology*, 2010, 31(1): 32–43.
- [4] ALGHANNAM A F, GHAITH M M, ALHUSSAIN M H. Regulation of energy substrate metabolism in endurance exercise[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(9): 4963.
- [5] 于青, 黄振飞, 刘军, 等. 肝素和高糖对人腹膜间皮细胞合成细胞外基质的影响及可能机制[J]. *上海医学*, 2003, 26(11): 808–810.
YU Q, HUANG Z F, LIU J, et al. Effect and mechanism of heparin and high concentration glucose on matrix biosynthesis in cultured human peritoneal mesothelial cells [J]. *Shanghai Medical Journal*, 2003, 26(11): 808–810.
- [6] 李丽娜, 陈新光, 吕游. 血清肝素结合蛋白在脓毒血症患者急性肾衰竭过程中的表达与意义[J]. *中国医药导报*, 2019, 16(11): 109–111.
LI L N, CHEN X G, LÜ Y. Expression and significance of serum heparin binding protein in acute renal failure in patients with sepsis [J]. *China Medical Herald*, 2019, 16(11): 109–111.
- [7] NAZARZADEH ZARE E, KHORSANDI D, ZAREPOUR A, et al. Biomedical applications of engineered heparin-based materials [J]. *Bioactive Materials*, 2024, 31: 87–118.
- [8] SHEN Y, SONG M M, WU S H, et al. Plant-based dietary fibers and polysaccharides as modulators of gut microbiota in intestinal and lung inflammation: current state and challenges [J]. *Nutrients*, 2023, 15(15): 3321.
- [9] ZHANG N, JIN M L, WANG K M, et al. Functional oligosaccharide fermentation in the gut: improving intestinal health and its determinant factors: a review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 284: 119043.
- [10] WANG L L, HU L J, YAN S, et al. Effects of different oligosaccharides at various dosages on the composition of gut microbiota and short-chain fatty acids in mice with constipation [J]. *Food & Function*, 2017, 8(5): 1966–1978.
- [11] YE Z L, WU Q M, YANG S S, et al. Variety and quantity of dietary insoluble fiber intake from different sources and risk of new-onset hypertension [J]. *BMC Medicine*, 2023(21): 21.
- [12] 宋华, 田建华, 周菲, 等. 小麦淀粉中添加不同膳食纤维对2型糖尿病患者餐后血糖增值的影响[J]. *中国临床康复*, 2005, 9(31): 90–92.
SONG H, TIAN J H, ZHOU F, et al. Influence on the increased value of postprandial blood glucose by adding different dietary fibers into wheat starch in type 2 diabetic patients [J]. *Chinese Journal of Clinical Rehabilitation*, 2005, 9(31): 90–92.
- [13] 吕梅霞, 张瑞, 王春瑜, 等. 鹰嘴豆膳食纤维对高脂血症大鼠血脂的影响[J]. *疾病预防控制通报*, 2018, 33(4): 11–13.
LÜ M X, ZHANG R, WANG C Y, et al. Influence of dietary fiber in chickpea on blood lipid of rats with hyperlipidemia [J]. *Bulletin of Disease Control & Prevention*, 2018, 33(4): 11–13.
- [14] VANDEPUTTE D, FALONY G, VIEIRA-SILVA S, et al. Prebiotic inulin-type fructans induce specific changes in the human gut microbiota [J]. *Gut*, 2017, 66(11): 1968–1974.
- [15] 郑宝东, 王琦, 郑亚凤, 等. 抗性淀粉的生物学功效及在食品加工中的应用[J]. *食品科学技术学报*, 2015, 33(5): 1–7.
ZHENG B D, WANG Q, ZHENG Y F, et al. Biological functions of resistant starch and its application in food processing [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 33(5): 1–7.
- [16] TEKIN T, FISUNOGLU M. A comprehensive review resistant starch-containing bread as a functional food: its effect on appetite, glycemic index, and glycemic response [J]. *Starch-Stärke*, 2023, 75(9/10): 2200291.
- [17] MAZIARZ M P, PREISENDANZ S, JUMA S, et al. Resistant starch lowers postprandial glucose and leptin in

- overweight adults consuming a moderate-to-high-fat diet: a randomized-controlled trial [J]. *Nutrition Journal*, 2017, 16(1): 14.
- [18] LE THANH-BLICHAZ J, ANIOŁA J, KOWALCZEWSKI P, et al. Type IV resistant starch increases cecum short chain fatty acids level in rats[J]. *Acta Biochimica Polonica*, 2014, 61(1): 109–114.
- [19] METZLER-ZEBELI B U, CANIBE N, MONTAGNE L, et al. Resistant starch reduces large intestinal pH and promotes fecal lactobacilli and bifidobacteria in pigs[J]. *Animal*, 2019, 13(1): 64–73.
- [20] ZHAO Y S, HASJIM J, LI L, et al. Inhibition of azoxymethane-induced preneoplastic lesions in the rat colon by a cooked stearic acid complexed high-amylose cornstarch[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(17): 9700–9708.
- [21] HIRA T, IKEE A, KISHIMOTO Y, et al. Resistant maltodextrin promotes fasting glucagon-like peptide-1 secretion and production together with glucose tolerance in rats[J]. *British Journal of Nutrition*, 2015, 114(1): 34–42.
- [22] KISHIMOTO Y, YOSHIKAWA Y, MIYAZATO S, et al. Effect of resistant maltodextrin on digestion and absorption of lipids [J]. *Journal of Health Science*, 2009, 55(5): 838–844.
- [23] RUIZ M SA, ESPINOSA M D B, CONTRERAS F C J, et al. Digestion-resistant maltodextrin effects on colonic transit time and stool weight: a randomized controlled clinical study[J]. *European Journal of Nutrition*, 2016, 55(8): 2389–2397.
- [24] WANG W F, GOU X H, XUE H A, et al. Ganoderan (GDN) regulates the growth, motility and apoptosis of non-small cell lung cancer cells through ERK signaling pathway *in vitro* and *in vivo* [J]. *Onco Targets and Therapy*, 2019, 12: 8821–8832.
- [25] CUI F, SHI C L, ZHOU X J, et al. *Lycium barbarum* polysaccharide extracted from *Lycium barbarum* leaves ameliorates asthma in mice by reducing inflammation and modulating gut microbiota [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2020, 23(7): 699–710.
- [26] HU H C, ZHANG W, XIONG P, et al. Anti-inflammatory and antioxidant activity of astragalus polysaccharide in ulcerative colitis: a systematic review and meta-analysis of animal studies[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 1043236.
- [27] MAITY P, SEN I K, CHAKRABORTY I, et al. Biologically active polysaccharide from edible mushrooms: a review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 172: 408–417.
- [28] PATTANAYAK M, MAITY P, SAMANTA S, et al. Studies on structure and antioxidant properties of a heteroglycan isolated from wild edible mushroom *Lentinus sajor-caju* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 322–331.
- [29] MANDAL E K, MAITY K, MAITY S, et al. Structural characterization of an immunoenhancing cytotoxic heteroglycan isolated from an edible mushroom *Calocybe indica* var. APK2 [J]. *Carbohydrate Research*, 2011, 346(14): 2237–2243.
- [30] SONG Y G, LI S X, GONG H, et al. Biopharmaceutical applications of microbial polysaccharides as materials: a review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 239: 124259.
- [31] LEE W, KANG N, KIM E A, et al. Radioprotective effects of a polysaccharide purified from *Lactobacillus plantarum*-fermented *Ishige okamurae* against oxidative stress caused by gamma ray-irradiation in zebrafish *in vivo* model [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 28: 83–89.
- [32] QIU S M, AWEYA J J, LIU X J, et al. Bioactive polysaccharides from red seaweed as potent food supplements: a systematic review of their extraction, purification, and biological activities [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 275: 118696.
- [33] XU Q, CHAO Y L, WAN Q B. Health benefit application of functional oligosaccharides [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3): 435–441.
- [34] YANG F, WEI J D, LU Y F, et al. Galacto-oligosaccharides modulate gut microbiota dysbiosis and intestinal permeability in rats with alcohol withdrawal syndrome [J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 60: 103423.
- [35] GENDA T, SASAKI Y, KONDO T, et al. Fructo-oligosaccharide-induced transient increases in cecal immunoglobulin A concentrations in rats are associated with mucosal inflammation in response to increased gut permeability [J]. *The Journal of Nutrition*, 2017, 147(10): 1900–1908.
- [36] CANI P D, JOLY E, HORSMANS Y, et al. Oligofructose promotes satiety in healthy human: a pilot study [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2006, 60(5): 567–572.
- [37] WONGKAEW M, TANGJAIDEE P, LEKSAWASDI N, et al. Mangopectic oligosaccharides: a novel prebiotic for functional food [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9:

- 798543.
- [38] BODE L. The functional biology of human milk oligosaccharides [J]. *Early Human Development*, 2015, 91(11): 619–622.
- [39] GREMBECKA M. Sugar alcohols: their role in the modern world of sweeteners; a review [J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 241(1): 1–14.
- [40] MÄKINEN K K. Sugar alcohol sweeteners as alternatives to sugar with special consideration of xylitol [J]. *Medical Principles and Practice; International Journal of the Kuwait University, Health Science Centre*, 2011, 20(4): 303–320.
- [41] LIVESEY G. Health potential of polyols as sugar replacers, with emphasis on low glycaemic properties [J]. *Nutrition Research Reviews*, 2003, 16(2): 163–191.
- [42] BOESTEN D M P H J, BERGER A, DE COCK P, et al. Multi-targeted mechanisms underlying the endothelial protective effects of the diabetic-safe sweetener erythritol [J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65741.
- [43] DEN HARTOG G J M, BOOTS A W, ADAM-PERROT A, et al. Erythritol is a sweet antioxidant [J]. *Nutrition*, 2010, 26(4): 449–458.
- [44] SARAIVA A, CARRASCOSA C, RAHEEM D, et al. Maltitol: analytical determination methods, applications in the food industry, metabolism and health impacts [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): 5227.
- [44] BEARDS E, TUOHY K, GIBSON G. A human volunteer study to assess the impact of confectionery sweeteners on the gut microbiota composition [J]. *British Journal of Nutrition*, 2010, 104(5): 701–708.

Research Progress on Functional Carbohydrates

JIN Zhengyu, CHENG Hao, CHEN Long

(*School of Food Science and Technology/State Key Lab of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China*)

Abstract: Carbohydrates exist widely in nature, mainly from plants, animals, microorganisms. Carbohydrates are generally divided into four groups: monosaccharides, disaccharides, oligosaccharides and polysaccharides. Carbohydrate is one of the three essential nutrients of human body, and the basic physiological function is to provide energy for the life activities of human body. However, with the rapid development of global social economy in recent years, people's health awareness has gradually increased, which makes everyone have a new demand for carbohydrate intake, and carbohydrates with various functions have become a hot spot for people to study. Meanwhile, more and more functional carbohydrates are being discovered and used in food. Functional carbohydrates mainly include dietary fiber, resistant starch, resistant dextrin, active polysaccharide, functional oligosaccharides, sugar alcohols and other sugar substitutes. They have a variety of physiological functions closely related to human health, and play an important role in providing energy, constituting body components, regulating protein metabolism, anti-ketogenesis, protecting the liver and regulating intestinal flora. The common physiological functions of carbohydrates and the research progress of common functional carbohydrates were reviewed. The development trend of functional carbohydrates in the future was prospected. This paper aimed to enrich people's scientific understanding of functional carbohydrates and provide theoretical reference for further research on functional carbohydrates and related food development.

Keywords: carbohydrates; functionality; resistant starch; resistant dextrin; functional oligosaccharides

(责任编辑:李 宁)