

异麦芽酮糖研究进展及其在食品加工中的应用

周泽玉¹, 康淞皓², 车会莲¹, 孙丽娟¹, 叶丽容¹, 吴广枫^{1*}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083) (2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 异麦芽酮糖作为功能性代糖, 风味和理化性质与蔗糖相似, 在抗酸、微生物发酵和晶体结构方面稳定, 吸湿性和溶解性相对较低, 适合应用于不同的食品配方。经大量研究证明, 其安全性和耐受性在亚慢性毒性、胚胎毒性、致突变性和人体研究等方面都有所保障。国内外异麦芽酮糖的生产方式主要为操作稳定可重复的固定化微生物转化或显著催化的固定化酶转化, 通过重结晶来提纯, 利用高效液相色谱定量检测。其具有血糖指数低、消化吸收速度相对缓慢、改善胰岛素反应、益生元特性、低致龋潜力、调节肠道菌群等健康功效, 在特殊医学用途食品(FSMP)、儿童食品、普通食品(包括乳制品、谷物制品等)、营养运动食品中都有深入研究和实际应用, 该文还结合现有监管政策提出重新梳理其食品添加剂和新食品原料双重身份的建议。

关键词: 异麦芽酮糖; 理化性质; 安全性; 制备检测; 健康功效; 应用分析

文章编号: 1673-9078(2024)07-379-392

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.7.0763

Advancements in Isomaltulose Research and Its Application in Food Processing

ZHOU Zeyu¹, KANG Songhao², CHE Huilian¹, SUN Lijuan¹, YE Lirong¹, WU Guangfeng^{1*}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a functional substitute for sugar, isomaltulose has similar flavor, physical, and chemical properties as sucrose. Isomaltulose is stable in terms of acid resistance, microbial fermentation, and crystal structure, and has relatively low hygroscopicity and solubility, making it suitable for use in different food formulations. Furthermore, several studies have demonstrated its safety and tolerability in subchronic toxicity, embryotoxicity, mutagenicity, and human studies. The production methods of isomaltulose domestically and internationally are predominantly consistent, utilizing reproducible immobilized microbial transformation or highly catalyzed immobilized enzymatic conversion, followed by purification through recrystallization. The resulting products can be quantitatively detected using high performance liquid chromatography. Isomaltulose has a low glycemic index, low caries potential, and relatively slow digestion and absorption. In addition, it improves insulin responses, prebiotic properties, and regulates the intestinal flora. Extensive research has been conducted on the practical utilization of isomaltulose in foods for special medical purposes (FSMP), children's foods, general foods (including dairy products and cereal products), and nutritional sports foods. This study evaluates current regulatory policies and integrates their findings to propose recommendations for re-evaluating the dual identity of isomaltulose in its application as a food additives and as a potential new food ingredient.

Key words: isomaltulose; physical and chemical properties; safety; preparation and detection; health benefits; application analysis

引文格式:

周泽玉, 康淞皓, 车会莲, 等. 异麦芽酮糖研究进展及其在食品加工中的应用[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 379-392.

ZHOU Zeyu, KANG Songhao, CHE Huilian, et al. Advancements in isomaltulose research and its application in food processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 379-392.

收稿日期: 2023-06-22

作者简介: 周泽玉(2001-), 女, 本科, 研究方向: 食品安全和食品化学, E-mail: 3458155427@qq.com

通讯作者: 吴广枫(1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全和食品化学, E-mail: wumaple@vip.sina.com

随着时代进步和居民饮食结构的变化,膳食中添加糖类的摄入大量增加^[1,2],根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)公布的糖摄入指南,儿童和成年人的糖摄入量应控制在总能量的10%以下,推荐每人每天添加糖摄入量不超过50 g,最好控制在25 g以下,然而人们的摄入仍然超过推荐值。相关研究表明,糖的过度摄入会造成一系列健康问题^[3,4],如导致胰岛素分泌功能受损诱发糖尿病,提供微生物生长营养诱发龋齿、牙周炎,热量高转化成脂肪导致肥胖、非酒精性脂肪肝,影响其他营养元素的吸收使钙摄入量不足引起骨质疏松等。可是减少糖的摄入对消费者来说是困难的,因为针对人或者大鼠的研究^[5,6]报道,高糖饮食导致受试体饮食倾向的显著改变时,未必导致体重变化和代谢异常,而是直接改写了大脑对食物的神经适应性行为,也就是通常所说的“上瘾”。

减少上述风险的可行性策略之一,是使用更健康的功能性甜味剂代替蔗糖加入食品^[7]。异麦芽酮糖是蔗糖的良好替代物,除了能提供极为相似的甜味之外,异麦芽酮糖还兼具很多功能特性,近年来在特殊食品和普通食品中都得到了广泛的应用。

1 异麦芽酮糖的发现与理化性质

1.1 认知历史

从二十世纪中叶开始,人们发现并逐步认识异麦芽酮糖,其认知历史见表1。

1.2 理化性质

1.2.1 概述

异麦芽酮糖,也叫帕拉金酮糖(Palatinose),化学名称6-O- α -D-吡喃葡萄糖基-D-呋喃果糖(6-O- α -D-Glucopyranosyl-D-Fructofuranose),分子

式 $C_{12}H_{22}O_{11} \cdot H_2O$,分子量360.32。它是蔗糖的一种同分异构体,熔点为123~124 $^{\circ}C$,热量4 kcal/g,旋光度 α^{20}_D 为+97°~98°,是还原糖,能进行美拉德反应,呈白色结晶状均匀颗粒或粉末,其味道、外观和水溶液黏度都与蔗糖相似^[12],甜度(Sweetening Power, SP)约为蔗糖的一半,是食品配方中蔗糖合适的代替品^[13-15]。虽然异麦芽酮糖的单糖组成与蔗糖相同,然而在市场应用中,蔗糖作为碳水化合物是食品原料,异麦芽酮糖仅以食品添加剂的身份参与食品加工。

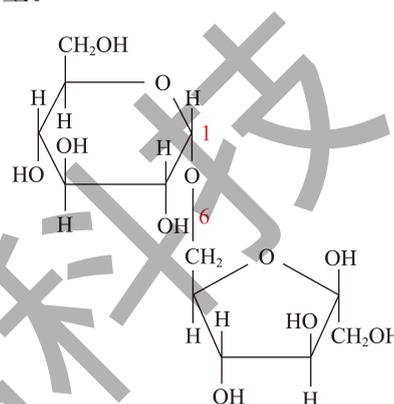


图1 异麦芽酮糖的分子结构

Fig.1 Molecular structure of isomaltulose

1.2.2 加工特性

相关试验表明,异麦芽酮糖在稳定性^[16]、吸湿性和溶解性方面的表现,使其在食品加工中的应用前景广阔。异麦芽酮糖与蔗糖相比性质更稳定,处于较强的酸或碱性环境中不水解,食品中的其他成分也难与其发生化学反应,不能被绝大多数微生物利用,而且吸湿性极低。因此,异麦芽酮糖在速溶粉末中能够自由地流动,易于制成饮料或其他类型产品。其添加至营养棒、糖果或发酵产品等食品中,也能减少烹调、加工、包装和销售环节的炎热潮湿环境影响,利于食品稳定及延长货架期。详见表2。

表1 异麦芽酮糖的认知历史

Table 1 Cognitive history of isomaltulose

时间	研究者	进展	内容	参考文献
1952年	Stodola等	首次发现	将蔗糖合成葡聚糖的过程中产生了新的二糖副产物,后命名为异麦芽酮糖	[8]
1967年	Siddiqui等	天然样品中检出	在加拿大渥太华觅食苜蓿和红三叶草的蜂群的蜂蜜样本	[9]
1979年	Jarell等	阐明结构	由D-葡萄糖和D-果糖组成,通过 α -1,6-糖苷键连接	[10]
1982年	Cheetham等	提出规模生产方案	包埋于藻酸盐凝胶中的大黄欧文氏菌(<i>Erwinia rhapontici</i>)细胞,每克蔗糖产生0.75 g异麦芽酮糖,半衰期为8 600 h。	[11]

表 2 异麦芽酮糖的加工特性

Table 2 Cognitive history of isomaltulose

性质	具体表现	食品加工	文献
酸稳定	其 (110 g/L) 在酸性可乐饮料 (pH 2.3) 中经过 3 个月的贮存不分解, 而同等条件下约有 98% 的蔗糖被分解	等渗透压或低渗透压运动饮料的理想选择	
微生物稳定	抵抗大多数酵母和细菌的发酵, 多数微生物不可利用	在啤酒或益生菌酸奶等发酵产品中增强甜味而不影响产品生产	[17]
晶体结构稳定	晶体结构及其结晶水稳定	作为干物质应用于谷物、冰淇淋、口香糖、饼干中, 或用于巧克力的精炼生产	[18]
不吸湿	在 25 °C, 相对湿度 85% 的条件下, 几乎不会吸收水分; 酸性的环境 (添加 1.5%~5% 的柠檬酸) 中, 其吸湿性不改变, 而同样环境下的蔗糖吸湿性大大增加	长时间的储存不发生结块, 适用于固体冲调饮料中。	[19,20]
溶解度远远低于蔗糖	20 °C 条件下的异麦芽酮糖溶解度为 38.4%, 而此时的蔗糖溶解度为异麦芽酮糖的 5.5 倍	用于润喉糖、止咳糖的生产中, 可以延长活性因子的释放时间, 使其发挥更持久的功效	[21]

2 安全性

2.1 亚慢性研究

在大鼠中已经进行了许多亚慢性口服研究。Kashimura 等^[22]在雄性 Wistar 大鼠的饮食中喂食 30% 蔗糖 (对照) 或 7.5% 和 15% 异麦芽酮糖 [约每天 3.7 和 7.5 g/(kg·bw)]13 周, 各组在体质量、血细胞比容和器官 (血浆、全血、脑、股骨、肾脏、肝脏、脾脏、胫骨和睾丸) 中的矿物质含量 (Ca、Mg、P、Fe、Zn、Cu 和 Mn) 方面没有显著差异, 结论是异麦芽酮糖既没有诱导大鼠矿物质状态的变化, 也没有诱导毒理学变化。

为了确认异麦芽酮糖的安全性, Jonker 等^[23]进行了另一项亚慢性毒性研究。将雄性和雌性 Wistar 大鼠各 20 只, 分别饲喂补充有 10% 蔗糖 (对照) 或 2.5%、5% 和 10% 异麦芽酮糖的饮食, 第 13 周进行对功能性和运动活动评估的每日临床观察和选择性测量, 检查眼部、体质量、食物消耗和饮水量, 做尿液分析以及尸检的血液学和临床化学检查。该研究得出结论, 在饮食水平高达 10% [雄性和雌性大鼠分别为每天 7.0 和 8.1 g/(kg·bw)] 的条件下, 异麦芽酮糖没有诱导任何毒性迹象。

2.2 胚胎毒性

用异麦芽酮糖饲喂从怀孕第 0 天到第 24 天的雌性 Wistar 大鼠, 水平为 0% (淀粉对照)、2.5%、5% 和 10% (淀粉掺入), 试验组和对照组的体质量、

食物摄入量、饮水量、尸检结果、生育能力、生殖性能、生殖器官重量和粪便数据相当, 对胎儿软组织和胎儿骨骼的检查未发现任何毒理学意义, 这些结果^[24]表明, 饮食水平高达 10% [7 g/(kg·d), 以体质量计] 的异麦芽酮糖既不会引起母体毒性, 也不会引起大鼠胎儿的任何胚胎毒性或致畸作用。

2.3 致突变性

在存在和不存在代谢激活的情况下, 对鼠伤寒沙门氏菌 (*Salmonella typhimurium*) 突变菌株 TA1535、TA98、TA100、TA1537 和 TA1538 在每板 100~4 000 μ g 的四种不同剂量水平下检查异麦芽酮糖的致突变活性, 结果^[25]证明异麦芽酮糖在 Ames 试验中没有诱变性。

2.4 人体研究

近年来的多项异麦芽酮糖的人体耐受性实验表明, 不同年龄和健康状况受试人群对异麦芽酮糖的消化、吸收、血糖、胰岛素反应等方面均耐受良好。受试者的年龄从刚成年 18 岁至老年 70 岁, 健康状况包括健康、超重、高血脂、1 型糖尿病、2 型糖尿病、手术切除大肠, 也来自中国、马来、印度和高加索等。受试人数从 7 人到多达 100 人。实验将异麦芽酮糖进行 50 g/d 的持续 12 周摄入或在 3 h 内大量摄入 165 g, 以体质量、BMI、耐受性、吸收率、碳水化合物氧化、脂肪氧化、心肺系统反应等多类指标为主要试验终点。详见表 3。

表 3 列入GRAS档案的异麦芽酮糖的耐受性

Table 3 Tolerance of isomaltulose included in GRAS archive

研究对象, 年龄, 健康状况	受试人数 实验设计	实验方法	(主要) 试验终点	耐受性	参考文献
61 ± 8 和 61 ± 9 岁成年人, 2型糖尿病, 分为异麦芽酮糖和蔗糖组	n=100 随机, 双盲, 对照试验, 2个平行组	50 g/d 异麦芽酮糖或 50 g/d 蔗糖加入食物和饮料, 持续 12 周	糖化血红蛋白 HbA1c, 餐后血糖、血清果糖胺、胰岛素、C-肽、胰岛素前体、非酯化脂肪酸 (NEFA)、总胆固醇、甘油三酯、LDL-胆固醇、HDL-胆固醇、凝血模式评价-胰岛素抵抗 (HOMA-IR)	参与者对两种饮食干预都很好地耐受	[26]
33~67 岁成年人, 终端回肠造口 (大肠手术切除)	n=10 随机, 双盲, 交叉研究	50 g 异麦芽酮糖加入饮料和饼干	血糖、胰岛素、异麦芽酮糖的消化性和吸收性	研究者报告, 异麦芽酮糖很好地耐受。异麦芽酮糖实际是在小肠水解吸收的, 通过测定 8 h 内收集的造口排泄物	[27]
48.2 岁成年人, 高血脂	n=20 随机, 双盲, 交叉研究	50 g/d 异麦芽酮糖或 50 g/d 蔗糖加入饮料和食物, 持续 4 周	血糖、胰岛素、体重、BMI、耐受性	每天摄入 50 g 异麦芽酮糖可以被很好地接受和耐受	[27]
健康人群, 年龄 23 ± 0.4 岁	n=8 随机队列研究	1 × 50 g 甘蔗糖 1 × 50 g 异麦芽酮糖单剂量, 150 mL 水 (在 2~3 min 内喝完)	血糖和胰岛素反应	研究中没有产生不良反应	[28]
18~35 岁健康男性	n=10 随机, 对照, 交叉研究	0.25、0.5、0.75 或 1 g/ 体质量, 溶于 4 mL 水/kg 体质量	吸收率	来自异麦芽酮糖的单糖较慢吸收率没有上升, 男性没有任何肠道不适或加速蠕动	[29]
34 ± 5 岁成年人, 1 型糖尿病	n=7 随机, 交叉研究	(41.8 ± 1.3) g 异麦芽酮糖或 (41.9 ± 1.2) g 葡萄糖 (相当于 0.6 g/kg 体质量) 异麦芽酮糖或葡萄糖在运动测试 2 h 前摄入 (平板跑步测试)	血糖、血乳酸和 pH 值, 碳水化合物氧化, 脂肪氧化, 心肺系统反应	研究者没有在论文中提到或报告任何不良反应	[30]
35 ± 2 岁成年人, 1 型糖尿病	n=8 随机, 交叉研究	75 g 葡萄糖或 75 g 异麦芽酮糖葡萄糖或异麦芽酮糖在运动测试 2 h 前摄入 (平板跑步测试)	血糖, 血乳酸, 碳水化合物氧化, 脂肪氧化, 心肺系统反应	研究者没有在论文中提到或报告任何不良反应	
21~40 岁健康中国成年人	n=20 随机、双盲、对照, 交叉研究	第 1 天: 30 g 异麦芽酮糖或 30 g 蔗糖加到晚餐的饮料 第 2 天: 总计 70 g/d 异麦芽酮糖或 70 g/d 蔗糖加到饮料 (30 g 早餐, 20 g 午餐, 20 g 晚餐)	24 h 连续血糖反应, 脂肪氧化	研究者没有在论文中提到或报告任何不良反应	[31,32]
27 ± 5 岁健康中国成年人	n=12 随机、单盲、对照, 交叉研究	总计 102 g/d 异麦芽酮糖或 102 g/d 蔗糖加到饮料和果冻 (25 g 异麦芽酮糖或 25 g 蔗糖午餐; 55 g 异麦芽酮糖或 55 g 蔗糖下午茶; 22 g 异麦芽酮糖或 22 g 蔗糖晚餐)	24 h 持续血糖反应	研究者没有在论文中提到或报告任何不良反应	[33]

续表 3

研究对象, 年龄, 健康状况	受试人数 实验设计	实验方法	(主要) 试验终点	耐受性	参考文献
21~40岁健康中国、马来、印度和高加索成年人	n=40 随机、交叉临床研究	50 g 异麦芽酮糖或 50 g 蔗糖溶于水	血糖反应	研究作者没有在论文中提到或报告任何不良反应	
31 ± 4 岁健康, 超重成年人	n=10 随机, 单盲, 交叉研究	75 g 蔗糖或 75 g 异麦芽酮糖溶解在水中	血糖和胰岛素反应, 非酯化脂肪酸, 甘油三酯, 饱腹感激素, 脂肪和碳水化合物氧化, 能量消耗	研究作者没有在论文中提到或报告任何不良反应	[34]
23 ± 0.4 岁健康受过训练的成年人	n=10 随机、交叉研究	总计约 165 g 异麦芽酮糖或蔗糖加到 1 950 mL 饮料 (600 mL 饮料含有 8.5% 异麦芽酮糖或蔗糖在运动前摄入, 以及每 15 min 摄入 150 mL 饮料含 8.5% 异麦芽酮糖或蔗糖持续 150 min)	血糖和胰岛素反应, 血乳酸, 游离脂肪酸, 脂肪氧化, 碳水化合物氧化	研究作者没有在论文中提到或报告任何不良反应	[35]

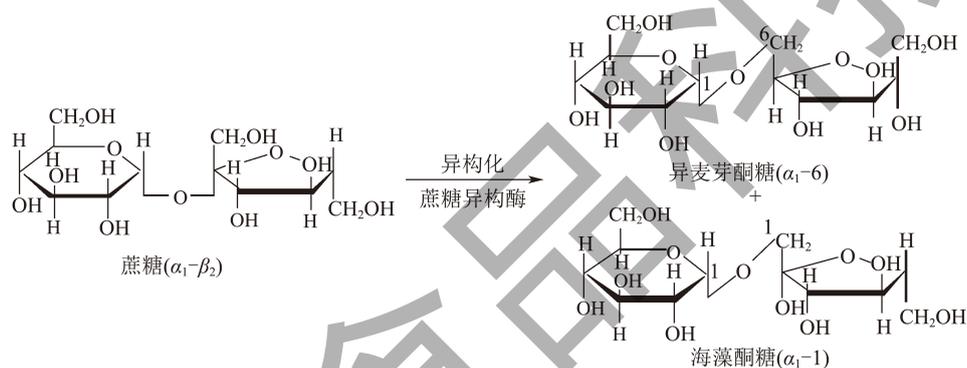


图 2 蔗糖异构酶生物催化蔗糖反应式

Fig.2 Sucrose isomerase biocatalyzed sucrose reaction

3 制备、提纯与检测

3.1 制备

天然的异麦芽酮糖含量极低, 无法通过提取的方式来满足日渐庞大的市场需求, 因此需要通过其他的方法提高产量。有关异麦芽酮糖的生产方法主要包括化学合成法、植物转化法、微生物转化法以及酶转化法。化学合成法^[36]成本高且易造成环境污染。植物转化法^[37]是指将异麦芽酮糖的基因转入到植物中, 让植物利用体内合成的蔗糖作为底物并将其转化为异麦芽酮糖的方法, 由于蔗糖是植物赖以生存的碳源, 蔗糖的大量消耗会导致植物的生长停滞, 所以将该技术用到异麦芽酮糖的生产中并不成熟。因此国内外生产异麦芽酮糖的主要方式为微生物转化法和酶转化法, 微生物转化法的本质也是通过菌体内表达的蔗糖异构酶 (Sucrose Isomerase, Slase) 来催化蔗糖生成异麦芽酮糖, 反应式见图 2。

文献中关于从游离微生物或酶产生异麦芽酮糖的研究很少, 使用固定化方法的研究更为常见。固定化过程包括催化剂间的聚合物基质中相互作用^[38], 该过程可以通过不同的技术进行, 例如挤出、物理吸附、喷雾干燥、流化床和乳化^[39]。此外, 还有许多类型的聚合物基质用于催化剂的固定化, 包括藻酸盐、明胶、壳聚糖、阿拉伯胶和黄原胶^[40]。两种方法详见表 4。

3.2 提纯

异麦芽酮糖的生产过程中不可避免地存在副产物海藻酮糖以及少量单糖。由于海藻酮糖以及单糖的溶解度都高于异麦芽酮糖, 故在工业生产中通常采用重结晶的方式对异麦芽酮糖进行提纯。首先通过蒸发系统将反应液浓缩至 70% 左右的浓度, 再用冷却循环水将其冷却, 最后加入约 1% 的异麦芽酮糖晶核, 促进异麦芽酮糖晶体的形成。Bucke 等^[45]通过重结晶的方式获得了纯度超过 99% 的异麦芽酮糖。

表 4 微生物转化法和酶转化法生产异麦芽酮糖

Table 4 Isomaltulose produced by microbial conversion and enzymatic transformation

生产方法	生产技术	技术要点	研究实例	技术特点
	原始菌株发酵	寻找高产的原始菌株	Cho 等 ^[41] 发现肠杆菌 FMB-1 菌株, 发酵产物中异麦芽酮糖超过总糖的 90%	分离鉴定工作量巨大、生产能力低下
	诱变菌株发酵	采用自动化、微型化、高灵敏度的高通量筛选方法	张洪达等 ^[42] 通过 DNS 法、TLC 法和 HPLC 法得到遗传性状稳定的突变株 LX3-1, 异麦芽酮糖产量提高了 41.87%	生产周期长、发酵液成分复杂、分离纯化目标产物成本高
微生物转化法	重组菌株发酵	将编码 Slase 的基因导入工程菌, 使其在生长代谢过程中生产	大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)、枯草芽孢杆菌 (<i>Bacillus subtilis</i>)、酿酒酵母 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)、乳酸乳球菌 (<i>Lactococcus lactis</i>)、解脂亚罗酵母 (<i>Yarrowia lipolytica</i>) 等可以作为宿主构建工程菌	部分宿主如大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>) 存在内毒素和细胞热原会干扰产物分离
	固定化细胞转化	将细胞悬浮液与固定化材料溶液混合, 逐滴挤出形成固定化珠	hellmers 等 ^[43] 采用 6% (m/m) 红色精朊杆菌 (<i>Protaminobacter rubrum</i>) 细胞与添加了 25% (m/m) Eudragit 型改性聚甲基丙烯酸甲酯作黏合剂和 69% (m/m) 二氧化硅 320 混合, 异麦芽酮糖的转化率约为 80%	细胞可循环、转化率高、分离产物的成本低
酶转化法	固定化酶转化	选用合适的载体材料实现酶的固定化	耿梦华等 ^[44] 实验了壳聚糖载体, 使产率稳定达到 87.8%	操作便捷, 酶储存稳定

3.3 检测

《食品安全国家标准 食品添加剂 异麦芽酮糖》(GB 1886.182-2016) 中异麦芽酮糖的检测方法为高效液相色谱法 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC), 用 HPLC 方法在选定的工作条件下 (色谱柱: 氨基柱 250 μm \times 4.6 μm 或同等分析效果的色谱柱。乙腈: 水 = 7:3 (体积比) 配制流动相, 用 0.45 μm 滤膜过滤后, 超声脱气备用。柱温: 30~40 $^{\circ}\text{C}$ 。流量: 1.0 mL/min。进样量: 10 μL 。), 通过色谱柱使样品溶液中各组分分离, 用示差折光检测器进行检测。

用于定量异麦芽酮糖的色谱方法分析时间较长 (60~210 min), Fels 等^[46]使用异核单量子相干 (Heteronuclear Single Quantum Coherence, HSQC) 核磁共振实验 (NMR-Experiments) 的测量方法。结果表明, 缩短扫描间延迟的 HSQC 方法成功定量了各种食品样品中的异麦芽酮糖, 非均匀采样 (Non-uniform Sampling, NUS) 的应用也不会干扰精度或准确度, 可以进一步减少分析时间。通过共享相邻极化进行加速 (Acceleration by Sharing Adjacent Polarization, ASAP) 的 ASAP-HSQC 方法非常快 (如果与 NUS 结合使用, 则可缩短至 6 min), 但结果的精确度还有待改进。

4 健康功效

4.1 消化吸收

异麦芽酮糖和蔗糖在机体吸收过程中, 水解后的果糖和葡萄糖遵循相同的代谢途径。二者区别在于, 基于体外酶动力学比较研究二者的水解速率, 发现异麦芽酮糖的水解时间比蔗糖慢 4~5 倍^[47], 这是因为 α -1-6 糖苷键的存在。蔗糖的消化主要发生在小肠的上部, 能够更早、更快地释放能量, 而异麦芽酮糖的吸收会沿着整个小肠, 缓慢释放能量, 更像是一种“持久能量”^[48]。这意味着当蔗糖的消化和吸收已经完成时, 异麦芽酮糖仍然为身体提供葡萄糖, 其整体消化基本上在小肠中完成, 没有大量的异麦芽酮糖到达大肠^[49]。

异麦芽酮糖提供与所有可消化碳水化合物相同水平的卡路里, 并且耐受性同样良好。

4.2 低血糖指数

蔗糖具有高 GI (61~65), 有助于餐后葡萄糖水平的提升。相比之下, 异麦芽酮糖具有低 GI (32), 在维持餐后葡萄糖方面起重要作用^[50]。在人类饮食中使用低 GI 的异麦芽酮糖, 可以调节葡萄糖代谢, 改善胰岛素反应, 促进脂肪氧化外, 降低患

糖尿病、肥胖症和心血管疾病的风险，并且可用于体质量管理^[51]。

Hwang 等^[52]比较了口服异麦芽酮糖与蔗糖对正常小鼠血糖反应的影响，结果表明，与蔗糖喂养的小鼠相比，摄入异麦芽酮糖导致血清葡萄糖、胰岛素和总胆固醇水平降低。此外，喂食异麦芽酮糖的小鼠比喂食蔗糖的小鼠体质量增加量（5.05 g）少，蔗糖的体质量增加为 5.67 g。Mateo-Gallego 等^[53]评估了富含异麦芽酮糖（16.5 g/d）的无酒精啤酒对超重或肥胖的 2 型糖尿病受试者的血糖控制的影响，作者观察到这些受试者在摄入异麦芽酮糖啤酒后胰岛素抵抗有所改善，而且受试者在十周后表现出显著的体重减轻（-1.77%）。

4.3 益生元特性

根据国际益生菌和益生元科学协会（International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics, ISAPP）的定义，益生元是“宿主微生物选择性利用的底物，赋予健康益处”。异麦芽酮糖会刺激某些益生菌微生物的生长或活性，具有益生元潜力^[54]。

在异麦芽酮糖（1%，m/V）的 MRS 培养基中，许多益生菌菌株生长良好^[55]，如副干酪乳杆菌（*L. paracasei*）、植物乳杆菌（*L. plantarum*）、鼠李糖乳杆菌（*L. rhamnosus*）、嗜酸乳杆菌（*L. acidophilus*）、动物双歧杆菌（*B. animalis*）、长双歧杆菌（*B. longum*）、短双歧杆菌（*B. breve*）和凝结芽孢杆菌（*B. coagulans*），其选择性地刺激这些微生物的生长。此外，异麦芽酮糖与动物芽孢杆菌（*B. animalis*）、鼠李糖乳杆菌（*L. rhamnosus*）和凝结芽孢杆菌（*B. coagulans*）的共培养显著提高了丙酸浓度，丙酸作为益生菌代谢物已被证明有许多健康益处，这表明异麦芽酮糖具有作为益生元和益生菌共同配制益生元的潜力。然而，需要强调的是，这些实验都是在体外进行的，尚需进行体内研究以确认其作为益生元的潜力。

Yang 等^[56]研究了异麦芽酮糖对大鼠肠道微生物群组成和功能的影响，给大鼠摄入含有异麦芽酮糖（10%，m/m）的水 5 周。结果发现，异麦芽酮糖影响大鼠的肠道微生物群，刺激有益微生物群如栖粪杆菌属（*Faecalibacterium*）和考拉杆菌属（*Phascolarctobacterium*）的生长，并降低病原体如舒特勒沃斯氏菌属（*Shuttleworthia*）的水平，丙酸盐和丁酸盐水平增加。作者认为异麦芽酮糖调节大鼠肠道微生物群和短链脂肪酸的产生，是

异麦芽酮糖益生元潜力的有力指标。

4.4 低龋齿潜力

在相关研究中，人们使用含有异麦芽酮糖的培养基，观察口腔细菌^[57]的产酸情况，结论是异麦芽酮糖的致龋性低于蔗糖^[58]。

2007 年异麦芽酮糖由美国食品和药物管理局（Food and Drug Administration, FDA）通过联邦登记册（FR 52789）批准进入非致龋名单，因为它被证明不会“被口腔细菌发酵到足以将牙菌斑 pH 值降低到导致牙釉质侵蚀的水平”。这种特性使得异麦芽酮糖可作为蔗糖替代品，用在蛀牙相关的食物如糖果、泡泡糖、巧克力和软饮料中。

4.5 调节肠道菌群

食品级的异麦芽酮糖可以调节健康人群的肠道微生物及其代谢产物。相关小鼠实验^[59]表明，异麦芽酮糖在防止结肠缩短、减少肠上皮破坏和抑制炎症细胞浸润方面发挥了重要作用，它可以通过显著减少了促炎细胞因子的产生，恢复辅助性 T 细胞 17 型（Th17）和调节性 T 细胞（Treg）之间的平衡，以及维持肠道免疫稳态和恢复部分紊乱的肠道微生物来达到预防或辅助治疗结肠炎。

4.6 综合比较

对比单糖（果糖和葡萄糖）、双糖（乳糖和蔗糖）、多糖（木薯糊精和寡糖麦芽糊精），异麦芽酮糖和它们的能量值均相同，为 4 kcal/g。其中的高 GI 碳水化合物（如蔗糖、葡萄糖、麦芽糊精和木薯糊精）能够被完全快速消化，与此同时也引起较快较高的血糖反应，过度摄入会带来毛囊堵塞、糖尿病、肥胖、认知障碍和老年痴呆等问题。低 GI 碳水化合物（如乳糖和果糖）虽然摄入后引起的血糖反应较低，但消化性和耐受性不良，可能导致肠胃不适。而异麦芽酮糖不仅以 46 的血糖生成指数位列低 GI 碳水化合物，摄入后的血糖反应水平相对较低，在消化吸收性和耐受性方面也同样有保障，它也是上述几种糖中唯一不会导致龋齿的糖。与其他碳水化合物相比，综合可消化性、能量、血糖反应、GI 值、是否导致龋齿等各方面特性来看，异麦芽酮糖整体表现优越。详见表 5。然而异麦芽酮糖因食品添加剂的身份，无法像上述几种糖一样作为碳水化合物来源用于普通食品或特殊医学用途配方食品，也不能以 4 kcal/g 列入能量计算。

表 5 异麦芽酮糖与其他碳水化物的比较

Table 5 Comparison of isomaltulose and other carbohydrates

碳水化合物类型	低 GI 碳水化合物			高 GI 碳水化合物			
	乳糖 (双糖)	异麦芽酮糖 (双糖)	果糖 (单糖)	蔗糖 (双糖)	葡萄糖 (单糖)	麦芽糊精 (寡糖)	木薯糊精 (多糖)
可消化性	消化性差, 耐受性不好, 会导致胃肠道不适。分解乳糖的乳糖酶随着年龄增长而减少。特别是亚洲人群的乳糖不耐受发生率很高。	完全且缓慢的消化。体内蔗糖-异麦芽糖酶完全水解异麦芽酮糖, 所以没有任何胃肠道不适。	消化性差, 耐受性不好, 会导致胃肠道不适。(当单独给予果糖溶液时, 40%~80%的人发生消化不良, 有些人只能吸收 15 g 果糖。如果一次性摄入 50 g 以上的果糖, 通常会发生胀气和腹泻。	完全快速消化	完全快速吸收	完全快速消化	完全快速消化
能量	4 kcal/g	4 kcal/g	4 kcal/g	4 kcal/g	4 kcal/g	4 kcal/g	4 kcal/g
血糖反应	相对低	慢且低, 更平衡/ 更低的波动	相当低	快, 相对高	快, 高	快, 高	快, 高
GI 值	46	32	23	68	100	80~100	99
不导致龋齿	否	是	否	否	否	否	否

5 在食品加工中的应用及监管

5.1 在特殊食品中的应用

5.1.1 糖尿病配方食品

糖尿病特殊医学食品通常强调产品的低血糖生成指数^[60], 对糖尿病全营养配方食品的基本要求是 $GI < 55$ ^[61]。用低血糖指数碳水化合物异麦芽酮糖来替代糖类及快速吸收的碳水化合物, 能满足上述要求。国外使用异麦芽酮糖的糖尿病特医产品已上市多年, 具有长期安全使用历史。产品形态包含饮料、粉剂等, 配料中还可能含有蛋白质、无机盐、维生素、膳食纤维物质, 也会添加用于调味的香料, 部分产品及成分如表 6 所示。在这些产品中, 异麦芽酮糖占总碳水化合物的 7.3% 到 59.3%, 其供能占总碳水化合物的 4.3% 到 45%。部分产品中异麦芽酮糖在总碳水化合物和总碳水化合物供能方面有着接近一半的占比, 如果因异麦芽酮糖的物料身份问题不将其列入计算, 那么能量计算结果将会产生较大偏差。

5.1.2 儿童配方食品

异麦芽酮糖在幼儿和较大儿童配方食品中也不乏应用, 产品包含饮料、粉剂、谷物、酱料、糖果、冷冻类等, 配料中还可能含有蛋白质、维生素、脂肪、糖类和调味香料等, 其产品及配方如表 7 所示。这些儿童配方食品的异麦芽酮糖用量表明, 异麦芽酮糖占总碳水化合物的 11.1% 到 90.9%, 其供能占总碳水化合物的 4.5% 到 97.1%。部分产品中异麦芽酮糖在总碳水化合物中占比超过九成, 在总碳水化

合物供能方面占比接近百分之百。同样地, 如果因异麦芽酮糖的物料身份问题否定其提供“碳源”的功能, 结果将不能准确反映该种食物的真实能量供给情况。

5.2 在普通食品中的应用

异麦芽酮糖具有纯正的甜味, 能掩盖气味、均衡口味, 从而提高食品的风味。异麦芽酮糖的理化指标与蔗糖相近, 在奶油等食品中取代蔗糖时, 产品的黏度和流体特征无明显变化^[62]。同时, 它还具有预防龋齿、缓慢放能、不造成血糖升高等功能, 为研制健康食品带来了更多选择。比如将异麦芽酮糖用于乳制品中, 能起到屏蔽气味、提升健康效力的作用, 为面向儿童及中老年人的乳制品研制提供了便利^[63]。所以, 在普通食品(包括乳制品、谷物制品等)、营养运动食品、儿童食品, 以及特殊医学用途食品(FSMP)的产品中, 都能见到异麦芽酮糖的应用。

在面包、糕点、饼干等烘焙食品中添加的异麦芽酮糖, 可以提高产品的贮存稳定性和风味, 而且限制用量不作具体规定, 按需添加即可^[64]。将异麦芽酮糖用在低水分含量的烘焙制品里, 它不吸湿的特点有助于改良产品质构^[65]。

为了避免硬糖果类产品在潮湿炎热的地区发粘和形变, 可以在其中加入异麦芽酮糖, 其理化性质稳定、便于研磨、吸湿性低等特性会带来理想的产品效果。异麦芽酮糖也用作原料制造糖果巧克力类的包衣, 如果仁糖浆、凝胶食品等产品和巧克力豆等。

表 6 异麦芽酮糖在糖尿病配方食品中的应用

Table 6 Application of isomaltulose in diabetes formula

产品名称	成分	营养信息
Nutricia Diasip (Vanilla Flavor) 销售国家: 澳大利亚	水, 异麦芽酮糖, 膳食纤维(低聚半乳糖(来自牛奶), 抗性糊精, 抗性淀粉, 纤维素), 植物油(菜籽油, 葵花籽油), 淀粉(木薯), 乳糖(来自牛奶), 乳清蛋白浓缩物(来自牛奶), 大豆分离蛋白, 香料(香草), 酸度调节剂(柠檬酸), 鱼油, 柠檬酸钾, 氯化胆碱, 类胡萝卜素(含大豆)(β-胡萝卜素, 叶黄素, 番茄红素), 氢氧化镁, 磷酸氢二钾, 氢氧化钾, L-抗坏血酸钠, 色素(姜黄素), 氯化钙, 柠檬酸钠, 磷酸三钙, 增稠剂(卡拉胶), 甜味剂(乙酰磺胺酸钾, 糖精钠), 乳酸亚铁, DL-α-生育酚乙酸酯, 碳酸钙, 硫酸锌, 烟酰胺, 乙酸视黄酯, 葡萄糖酸铜, D-泛酸钙, 氯化铬, 硫酸锰, 亚硒酸钠, D-生物素, 盐酸硫胺素, 氰钴胺素, 胆钙化醇, 盐酸吡哆醇, 紫檀酰一谷氨酸, 核黄素, 钼酸钠, 碘化钾, 氟化钠, 植物甲萘醌。	≈占总碳水化合物 38%* ≈总碳水化合物供能比 45%
Tan Uc Viet Articare 销售国家: 越南	异麦芽酮糖, 大豆蛋白, 乳蛋白, Omega3, Omega6, 异藻, 可溶性纤维(低聚果糖/菊粉), 维生素(维生素 A, 维生素 B1, 维生素 B2, 维生素 B2, 烟酸蛋白, 泛素, 泛素酸, 维生素 B6, 生物素, 维生素 B12, 维生素 B12, 维生素 B12, 维生素 B12) C, 维生素 D3, 维生素 E, 维生素 K1), 矿物质(钠, 钾, 氯化物, 钙, 磷, 磷, 镁, 锰, 铁, 碘, 碘, 锌, 硒, 铜), 胆碱, 牛磺酸。	35 g/59 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 59.3% ≈总碳水化合物供能比 30.2%
Danone Nutricia Diasip 销售国家: 巴西	麦芽糊精, 低聚果糖, 酪蛋白酸钙, 异麦芽酮糖, 植物油(葵花籽油(高油酸含量), 低芥酸菜籽油, 菜籽油, 棕榈油), 分离大豆蛋白, 分离乳清蛋白, 鱼油, 氯化胆碱, L-抗坏血酸, 抗坏血酸钠, 硫酸锌, 棕榈酸视黄酯, DL-α-生育酚乙酸酯, 核黄素, 叶酸, 胆钙化醇, 植物甲萘醌, D-生物素, 氰钴胺素, 乳化剂(大豆卵磷脂), 香料, 甜味剂(甜菊糖苷)。	5.9 g/28 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 21.1% ≈总碳水化合物供能比 11.1%
Nutricare Colos Glucare 销售国家: 越南	蛋白质(乳蛋白, 大豆蛋白, 乳清蛋白), 植物脂肪, 糖替代品(帕拉金糖(9%), 异麦芽酮糖醇(9%), 麦芽糖醇(5%)), 果糖, 益生元(聚葡萄糖), 初乳, 维生素和矿物质预混料(乙酸视黄酯, 胆钙化醇, dl-α-生育酚乙酸酯, 叶绿素, L-抗坏血酸钠, 一硝酸硫胺素, 核黄素, 烟酰胺, 钙-D-泛酸酯, 盐酸吡哆醇, 叶酸, 氰钴胺素, D-生物素, 氯化钠, 氯化钾, 碳酸钙, 氧化镁, 焦磷酸铁, 硫酸锌, 碘化钠, 硫酸锰, 硫酸铜, 亚硒酸钠, 氯化铬, 钼酸钠), 麦芽糖糊精, 胆碱, 牛磺酸, 合成香草风味料。	9 g/59.70 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 15.1% ≈总碳水化合物供能比 8.8%
Powerlife Pharmaceuticals Metabolic+Sauver 销售国家: 马来西亚	椰子油粉, 中链甘油三酯(MCT), 分离大豆蛋白, 菜籽油粉, 麦芽糖糊精, 菊粉, MCT粉, 异麦芽酮糖, 难消化性麦芽糖糊精, 燕麦纤维, 矿物质(磷酸钙, 氯化钾, 氧化镁, 硫酸铜(麦芽糖糊精, 硫酸铜), 柠檬酸钙, 柠檬酸钠, 硒酵母, 硫酸锌, 钼酵母, 铬酵母, 葡萄糖酸锰, 焦磷酸铁, 吡啶甲酸铬, 碘化钾), 维生素(抗坏血酸钠, 维生素 E, 泛酸钙, 酒石酸胆碱, 生物素, 烟酰胺, 维生素 A, 维生素 B12, 维生素 B6, 维生素 D3, 维生素 K1, 维生素 B2, 维生素 B1, 叶酸), 草药提取物(肉桂提取物, 植物甾醇, 姜黄提取物, 匙羹藤叶提取物, 葫芦巴提取物, 苦瓜提取物, 番石榴叶提取物, 桑叶提取物, 葡萄籽提取物), 肌醇, 牛磺酸, 左旋肉碱, 辅酶 Q10, 氯化钠。	7 g/49.5 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 14.1% ≈总碳水化合物供能比 6.4%
Sanghiang Perkasa Kalbe Diabetasol 销售国家: 印度尼西亚	基础粉(异麦芽酮糖, 乳清蛋白分离物, 乳清蛋白浓缩物, 天然甜味剂(山梨糖醇), 酪蛋白酸盐, 抗氧化剂(抗坏血酸棕榈酸酯, DL-α-生育酚)), 酪蛋白酸钙, 麦芽糖糊精, 合成香料, 人造甜味剂(三氯蔗糖), 钙, 维生素 C, 维生素预混料, 矿物质预混料。	4 g/39 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 10.3% ≈总碳水化合物供能比 6.4%
Himalaya Quista DN 销售国家: 印度	脱脂奶粉(34%), 麦芽糖糊精, 大豆分离蛋白, 膳食纤维(10%)(阿拉伯树胶, 小麦纤维(1.9%), 瓜尔豆胶), 高油酸葵花籽油粉, 果糖, 豌豆蛋白浓缩物(4%), 异麦芽酮糖(4%), 矿物质, 酪蛋白酸盐(1%), ACCTI混合物(0.7%)(肌醇, 左旋肉碱, α-硫辛酸, 牛磺酸, 辅酶 Q10), 苹果多酚(0.2%)(标准化根皮苷), 稳定剂(INS415), 维生素, 香蕉提取物(0.1%)(标准化为科罗索酸), 抗结块剂(INS551), 添加天然白巧克力调味物质, 人造白巧克力调味物质。	4 g/55 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 7.3% ≈总碳水化合物供能比 4.3%

表 7 异麦芽酮糖在幼儿和较大儿童配方食品中的应用

Table 7 Application of isomaltulose in prescription foods for infants and older children

产品类型	产品名称	配方	异麦芽酮糖用量
运动营养食品	Squeezy Athletic Weight Control Meal Replacement 销售国家: 德国	发酵糖 (50%) (小麦, 奶制品), 乳蛋白 (20%), 异麦芽酮糖* (15%), 乳化剂 (大豆卵磷脂, 脂肪酸甘油单酯和甘油二酯), 增稠剂 (黄原胶, 瓜尔豆胶), 柠檬酸镁, 香料, 柠檬酸钠, 氯化钾, 柠檬酸钙, 抗结块剂 (磷酸三钙), 甜味剂 (三氯蔗糖), 麦芽糖糊精, 抗坏血酸, 富马酸铁, dl- α -生育酚乙酸酯, 烟酰胺, 乳酸锌, 乙酸视黄酯, 泛酸钙-d-泛酸酯, 葡萄糖酸铜, 盐酸吡哆醇, 胆钙化醇, 核黄素, 一硝酸硫胺素, 紫檀酰单谷氨酸, 碘化钾, 亚硒酸钠, 植物甲醛, D-生物素, 氰钴胺素。 (*异麦芽酮糖是葡萄糖和果糖的来源)	15 g/31 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 48.4% ≈总碳水化合物供能比 15.5%
能量棒	Bourbon Wingram Slowbar 销售国家: 日本	小麦粉, 起酥油, 异麦芽酮糖, 糖, 葡萄干, 发酵乳 (巴氏杀菌), 蔓越莓干, 全蛋液, 蓝莓干, 盐, 改性淀粉 (来自小麦), 山梨糖醇, 未煨烧蛋壳钙 (鸡蛋来源), 甘油, 乳化剂, 香料, 乳化剂 (大豆), 维生素 E, 焦磷酸铁, 烟酸, 泛酸钙, 维生素 B1, 维生素 B2, 维生素 B6, 维生素 A, 叶酸, 维生素 D, 维生素 B12。	4.3 g/27.6 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 15.6% ≈总碳水化合物供能比 9.8%
能量饮料	DD Nutritions Mealo Sports Drink 销售国家: 印度	胶束酪蛋白, 三氯蔗糖, 膳食纤维, 异麦芽酮糖 (纯净水, 添加香料 (天然相同的卡布奇诺调味物质))。	10 g/13.15 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 76% ≈总碳水化合物供能比 30.6%
能量饮料	Clutch Cognition Energy Drink 销售国家: 丹麦	苏打水, 异麦芽酮糖 (6%), 瓜尔豆纤维 (0.9%), 酸度调节剂 (柠檬酸), 绿燕麦提取物, 天然香料 (焦糖味, 酸橙味), 绿茶提取物, 鼠尾草提取物, 天然香料, 维生素 C, 维生素 B5。	6 g/6.60 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 90.9% ≈总碳水化合物供能比 97.1%
奶粉	Sanghiang Perkasa Kalbe Slim & Fit Milk Powder 销售国家: 印尼	脱脂奶粉 (37.07%), 异麦芽酮糖, 聚葡萄糖, 酪蛋白酸钙, 乳清蛋白浓缩物, 植物奶精 (牛奶蛋白), 奶粉, 菊粉, 合成香料 (天然甜味剂 (甜菊糖苷)), 稳定剂 (磷酸钠), 人造甜味剂 (三氯蔗糖), 维生素预混料, 矿物质预混料。	9 g/24 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 37.5% ≈总碳水化合物供能比 18%
谷物	Nestlé Fitness Chocolate Granola 销售国家: 西班牙	全麦燕麦片 (40.9%), 全麦燕麦粉 (12.3%), 巧克力片 (10%) (糖, 可可, 可可脂, 乳化剂 (向日葵卵磷脂), 天然香料), 葵花籽油, 糖, 异麦芽酮糖 (7%), 米粉 (4.9%), 脱水葡萄糖浆, 转化糖浆, 全麦小麦 (2.4%), 小麦粉 (1.8%), 可可粉, 碳酸钙, 盐, 大麦麦芽提取物, 椰子, 抗氧化剂 (富含生育酚的提取物), 铁。	7 g/63.10 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 11.1% ≈总碳水化合物供能比 6.3%
豆浆	Dr. Chung's Food Vegemil Black Soy Milk 销售国家: 韩国	大豆液 (93%), 黑豆提取物 (2%) (固体 (7%), 黑豆), 结晶果糖, 大豆油, 异麦芽酮糖, 混合制剂 (碳酸钙, 大豆多糖), 柠檬酸钠, 精制盐, 脂肪酸甘油酯, 亚麻籽油, β -葡聚糖, 朝鲜蓟提取物粉末, L-蛋氨酸, 混合制剂 (维生素 D3, 维生素 E, 阿拉伯树胶, 蔗糖, 玉米淀粉, 加工脂肪, 氧化锌), 结晶果糖, 大豆油, 混合制剂 (碳酸钙, 大豆多糖), 精制盐, 脂肪酸甘油酯, 鳞翅目菌丝体粉, L-精氨酸, 亚麻籽油, 角叉菜胶, 精制鱼油, L-蛋氨酸, 酵母成分, 氧化锌, 混合配方 (维生素 D3, 维生素 E, 阿拉伯树胶, 蔗糖, 玉米淀粉, 人造脂肪, 氧化锌), 人造苏格兰米香料。	1.2 g/7.0 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 17.1% ≈总碳水化合物供能比 4.5%
坚果黄油酱	South West International Tasty Dbs Hazelnut Spread 销售国家: 墨西哥	异麦芽酮糖醇 (22.2%), 异麦芽酮糖, 植物油 (22%), 榛子 (14%), 可可, 脱脂奶粉, Trucal 乳钙, 乳钙, 大豆卵磷脂, 乳化剂 (聚甘油聚蓖麻油酸酯), 天然香料, 人造香料, 三氯蔗糖。	22 g/50.0 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 44% ≈总碳水化合物供能比 18.1%
雪糕冰淇淋	Lotus's Jeed Jard Tamarind Sorbet 销售国家: 泰国	罗望子泥汁 (14.87%), 糖 (12.48%), 异麦芽酮糖 (8.32%), 葡萄糖 (2.50%), 食品添加剂 (INS150d、INS330、INS410、INS412、INS464、INS508、INS1200), 人造香料。	4.16 g/15.0 g 碳水化合物 ≈占总碳水化合物 27.7% ≈总碳水化合物供能比 27.7%
糖	SIS '88 Low GI Sugar 销售国家: 新加坡, 阿联酋	糖, 异麦芽酮糖。	2.5 g/5 g 碳水化合物 = 占总碳水化合物 50% = 总碳水化合物供能比 50%

5.3 监管政策

5.3.1 国外监管情况

异麦芽酮糖的安全性已通过德国联邦风险评价研究所(BfR)的评估,EU于2005年批准其为新资源食品,在使用中无食品类别限制,也无使用量限制。因此,它可用于特殊医学用途配方食品^[66,67]。在美国,根据GRNNo.184通知,异麦芽酮糖自2006年起批准为GRAS(公认安全),并且不限制每天的摄取量,可以在5%~20%的水平上用于包括医用食品的“Nutritive formula”中^[68]。在加拿大,异麦芽酮糖自2012年起被批准为新资源食品,列入了加拿大卫生部已完成安全评估的新资源食品目录。该批准中无食品类别和量的使用限制,可用于“特殊膳食食品”^[69]。在澳大利亚和新西兰,异麦芽酮糖的安全性已通过澳大利亚和新西兰食品标准局(FSANZ)的评估,自2007年起被批准为一种新资源食品被列入《食品标准法典》附表25-允许使用的新资源食品中,且无食品类别和量的使用限制,可用于特殊医学用途配方食品^[70]。

5.3.2 国内监管情况

在我国,异麦芽酮糖于1992年被批准为食品添加剂且按生产需要适量使用。2013年10月实施的《新食品原料申报与受理规定》中明确规定,已列入《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》(GB2760)的物料不属于新食品原料申报范围,至此,它只存在食品添加剂一种法规身份,无法申请新食品原料。国内企业大多以“伊代欣糖”食品原料(食品生产许可证类别:食糖或淀粉糖)的身份生产销售异麦芽酮糖,在“伊代欣糖”行业标准QB/T4916-2016中,伊代欣糖的理化指标为“异麦芽酮糖含量 $\geq 96.5\%$,干燥失重 $\leq 1.5\%$,灼烧残渣 $\leq 0.1\%$ ”。

对于异麦芽酮糖的生产及应用企业来说,由于其食品原料法规身份缺失,作为碳水化合物的优势很难在市场上得到推广,已经限制了其在食品行业的生产与应用,给企业带来了较大的困扰,尤其在产品注册、能量计算时企业将面临巨大的法规身份难题。显然,异麦芽酮糖做为食品原料的法规身份亟须解决。

5.4 政策建议

特殊医学用途配方食品在我国还处于刚起步阶

段,异麦芽酮糖这类产品在上世纪九十年代确定法规身份时,国内尚无特医食品的概念,较少涉及食物成分的能量计算,当年建立的异麦芽酮糖法规标准已经难以适应当前行业发展的需要。异麦芽酮糖的食用安全性已达成行业共识,建议从法规的层面探究解决物料双重身份的问题,将其生产和使用纳入到合理的法规标准框架中,以兼顾产业的健康发展和市场需求,共同推进特殊医学用途配方食品的创新发展。

具体到异麦芽酮糖的生产及使用,可考虑在制定《食品安全国家标准 糖尿病全营养配方食品》或在修订《食品安全国家标准 特殊医学用途配方食品通则》(GB29922)的过程中,允许使用异麦芽酮糖作为食品原料(即低GI碳水化合物来源)使用并记入能量计算(4 kcal/g),同时探索建立关于异麦芽酮糖作为食品原料的物料特性、安全性、食用量等内容标准体系以规范生产和使用。

6 结论与展望

异麦芽酮糖是一种极具潜力的蔗糖替代品。其安全性经过了亚慢性毒性、胚胎毒性、致突变性和人体实际摄入的检验。风味和理化性质与蔗糖相似,其在稳定性、吸湿性、溶解性方面的特点有助于其在食品配方中的应用。异麦芽酮糖的血糖指数低、消化吸收速度相对缓慢,能够改善胰岛素反应、可作为益生元并促进益生菌的生长、具有低致龋潜力,因为它对人类健康的多个优点,异麦芽酮糖已被广泛地研究和应用。随着消费者健康意识的提高、对功能性食品需求的增加,异麦芽酮糖将在减少与高糖饮食相关疾病和改善人类健康方面发挥重要作用。开发具有功能特性的异麦芽酮糖配方食品前景可期。

使用固定化的微生物、酶或重组菌株是生产异麦芽酮糖的最佳生物技术途径,技术瓶颈在于如何实现稳定的工业化高效连续生产,并保持低成本和产品的高纯度。

参考文献

- [1] POWELL E S, SMITH-TAILLIE L P, POPKIN B M. Added sugars intake across the distribution of US children and adult consumers:1977-2012 [J]. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 2016, 116(10): 1543-1550.
- [2] KAY M F, GEARAN E C, COLIN S. Added sugars in school

- meals and the diets of school-age children [J]. *Nutrients*, 2021, 13(2): 471.
- [3] 张伟,马骁,程浩,等.高糖饮食与炎症性疾病研究进展[J]. *四川大学学报(医学版)*,2022,53(3):538-542.
- [4] 古兰·托合提木拉提,叶尔努尔·吐苏甫汗,马玉兰,等.高脂高糖饮食暴露诱导大鼠多囊卵巢综合征研究[J]. *生殖医学杂志*,2019,28(2):169-173.
- [5] FILGUEIRAS R A, ALMEIDA D P B V, NOGUEIRA K C P, et al. Exploring the consumption of ultra-processed foods and its association with food addiction in overweight children [J]. *Appetite*, 2019, 135(4): 137-145.
- [6] CAMPANA B, BRASIEL G P, AGUIAR D S A, et al. Obesity and food addiction: Similarities to drug addiction [J]. *Obesity Medicine*, 2019, 16(C): 100136-100136.
- [7] MONACO D R, MIELE A N, CABISIDAN K E, et al. Strategies to reduce sugars in food [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 19(2): 92-97.
- [8] STODOLA H F, KOEPEL J H, SHARPE S E. A new disaccharide produced by *Leuconostoc mesenteroides* [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 74(12): 3202-3203.
- [9] SIDDIQUI R I, FURGALA B. Isolation and characterization of oligosaccharides from honey [J]. *Journal of Apicultural Research*, 2015, 6(3): 139-145.
- [10] HAROLD C J, THOMAS F C, PATRICK M, et al. Manifestation of anomeric form, ring structure, and linkage in the ¹³C-n.m.r. spectra of oligomers and polymers containing D-fructose: maltulose, isomaltulose, sucrose, leucrose, 1-kestose, nystose, inulin, and grass levan [J]. *Carbohydrate Research*, 1979, 76(1): 45-57.
- [11] CHEETHAM P, IMBER C, ISHERWOOD J. The formation of isomaltulose by immobilized *Erwinia rhapsontici* [J]. *Nature*, 1982, 299 (5884): 628-631.
- [12] CÂNDIDO F W S D, CHAVES L F A, SOARES J R C D, et al. Isomaltulose: from origin to application and its beneficial properties-a bibliometric approach [J]. *Food Research International*, 2022, 155(4): 111061-111061.
- [13] RAINA H, IVANKA P. Effect of sucrose replacement on nutritional parameters and sensory characteristics of the lollipops with isomaltulose [J]. *BIO Web of Conferences*, 2023, 58(1): 01013-01013.
- [14] RAINA H, YUSUF H. Isomaltulose as an alternative to sucrose in the composition of Turkish delight (lokum) [J]. *BIO Web of Conferences*, 2022, 45: 01007-01007.
- [15] ATHINA L, KALI K, G C B. Nutritional and technological aspects of barley β -glucan enriched biscuits containing isomaltulose as sucrose replacer [J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2022, 2(3): 100060-100060.
- [16] SAWALE D P, SHENDURSE M A, MOHAN S M, et al. Isomaltulose (Palatinose)-An emerging carbohydrate [J]. *Food Bioscience*, 2017, 18(6): 46-52.
- [17] MATEO-GALLEGO R, PÉREZ-CALAHORRA S, LAMIQUIZ-MONEO I, et al. Effect of an alcohol-free beer enriched with isomaltulose and a resistant dextrin on insulin resistance in diabetic patients with overweight or obesity [J]. *Atherosclerosis*, 2019, 287(C): 93-94.
- [18] KIM H W, LEE S W, HAN S H, et al. Physicochemical properties and glucose tolerance of low-calorie cookies containing palatinose [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(11): 15958-15958.
- [19] 耿梦华.普成沙雷氏杆菌蔗糖异构酶的发酵优化及固定化[D].无锡:江南大学,2017.
- [20] 张艳琴.异麦芽酮糖的研究与应用[J]. *轻工科技*,2013, 29(5):23-24.
- [21] RODRIGUES J C D, GOMES L J C, CARREGARI T P, et al. Properties of isomaltulose (Palatinose®) – an emerging healthy carbohydrate: effect of temperature and solute concentration [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 347(1): 118304-118304.
- [22] KASHIMURA J, KIMURA M, KONDO H, et al. Effects of palatinose and its condensates on contents of various minerals in rat various tissues [J]. *Journal of Japanese Society of Nutrition and Food Science*, 1992, 45: 49-54.
- [23] JONKER D, LINA B.A.R., KOZIANOWSKI G, 2002. 13-Week oral toxicity study with isomaltulose (Palatinose) in rats [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40(10): 1383-9.
- [24] LINA B A R, SMITS-VAN P A E, D, et al. Embryotoxicity/teratogenicity study with isomaltulose (Palatinose) in rats [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1997, 35: 309-314.
- [25] 郑建仙.功能性食品(第一卷)[M]北京:中国轻工业出版社,1995.
- [26] STEFANIE B, INES H, STEPHAN T, et al. Metabolic effects of replacing sucrose by isomaltulose in subjects with type 2 diabetes: a randomized double-blind trial [J]. *Diabetes Care*, 2012, 35(6): 1249-1251.
- [27] HOLUB, INES, GOSTNER, et al. Novel findings on the metabolic effects of the low glycaemic carbohydrate isomaltulose (Palatinose (TM)) [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2010, 103(12): 1730-1737.
- [28] KAWAI K, YOSHIKAWA H, YAMASHITA K, et al. Usefulness of palatinose as a caloric sweetener for diabetic patients [J]. *Hormone and Metabolic Research*, 1989, 21(6): 338-340.
- [29] MACDONALD I, DANIEL J W. The bio-availability of isomaltulose in man and rat [J]. *Nutrition Reports International*, 1983, 28(5): 1083-1090.
- [30] MICHAEL R B, RHYDIAN P, BENJAMIN G, et al. Isomaltulose improves glycemia and maintains run

- performance in type 1 diabetes [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2012, 44(5): 800-808.
- [31] CAN V P G J, IJZERMAN H T, LOON V C J L, et al. Reduced glycaemic and insulinaemic responses following isomaltulose ingestion: implications for postprandial substrate use [J]. *British Journal of Nutrition*, 2009, 102(10): 1408-1413.
- [32] KAHLHÖFER J, KARSCHIN J, SILBERHORN-BÜHLER H, et al. Effect of low-glycemic-sugar-sweetened beverages on glucose metabolism and macronutrient oxidation in healthy men [J]. *International Journal of Obesity* (2005), 2016, 40(6): 990-997.
- [33] KELLER J, KAHLHÖFER J, PETER A, et al. Effects of low versus high glycemic index sugar-sweetened beverages on postprandial vasodilatation and inactivity-induced impairment of glucose metabolism in healthy men [J]. *Nutrients*, 2016, 8(12): 802.
- [34] HENRY J C, KAUR B, QUEK C Y R, et al. A low glycaemic index diet incorporating isomaltulose is associated with lower glycaemic response and variability, and promotes fat oxidation in Asians [J]. *Nutrients*, 2017, 9(5): 473-473.
- [35] TAN K S W, TAN S, HENRY J C. Ethnic variability in glycemic response to sucrose and isomaltulose [J]. *Nutrients*, 2017, 9(4): 347-347.
- [36] 杨文雄.功能性甜味剂帕拉金糖研究进展[C]//江苏:中国食品添加剂生产应用工业协会甜味剂专业委员会,2007, 24-27.
- [37] 葛亚中,徐俊.异麦芽酮糖的转基因法生产研究[J].*中国食品添加剂*,2004,3:14-18.
- [38] BASSANI C J, SANTOS Q A V, BARBOSA-DEKKER M A, et al. Microbial cell encapsulation as a strategy for the maintenance of stock cultures [J]. *LWT*, 2018, 102(12): 411-417.
- [39] RODRIGUES F, CEDRAN M, BICAS J, et al. Encapsulated probiotic cells: relevant techniques, natural sources as encapsulating materials and food applications—a narrative review [J]. *Food Research International*, 2020, 137(1): 109682-109682.
- [40] FRAKOLAKI G, GIANNOU V, TOPAKAS E, et al. Effect of various encapsulating agents on the beads' morphology and the viability of cells during BB-12 encapsulation through extrusion [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 294(4): 110423-110423.
- [41] CHO M H, PARK S E, LIM J K, et al. Conversion of sucrose into isomaltulose by *Enterobacter* sp. FMB1, an isomaltulose-producing microorganism isolated from traditional Korean food [J]. *Biotechnology Letters*, 2006, 29(3): 453-458.
- [42] 张洪达,杨帆,薛婷婷.常压室温等离子体诱变及高效筛选异麦芽酮糖高产菌株[J].*大连工业大学学报*,2018, 37(4):235-238.
- [43] HELLMEARS F, TAKORS R, THUM O. Robust enzyme immobilizates for industrial isomalt production [J]. *Molecular Catalysis*, 2018, 445(2): 293-298.
- [44] 耿梦华,陈晟,吴敬,等.吸附交联法固定化蔗糖异构酶及其在异麦芽酮糖制备中的应用[J].*食品与生物技术学报*, 2019,38(4):104-110.
- [45] CHRISTOPHER B, JAMES S P C. Production of isomaltulose: US EP0028900.[P].1981-5-20.
- [46] LEA F, FRANZISKA R, MIRKO B. Quantification of isomaltulose in food products by using Heteronuclear single quantum Coherence NMR-experiments [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9(6): 928102.
- [47] OOSTHUYSE T, CARSTENS M, MILLEN A M. Ingesting isomaltulose versus fructose-maltodextrin during prolonged moderate-heavy exercise increases fat oxidation but impairs gastrointestinal comfort and cycling performance [J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise*, 2015, 25(5): 427-438.
- [48] SHYAM S, RAMADAS A, Chang S K. Isomaltulose: Recent evidence for health benefits [J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 48(5): 173-178.
- [49] LINA B.A.R., JONKER D, KOZIANOWSKI G. Isomaltulose (Isomaltulose)-a review of biological and toxicological studies [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40(10): 1375-81.
- [50] MIYASHITA M, HAMADA Y, FUJIHIRA K, et al. The effects of isomaltulose ingestion on gastric parameters and cycling performance in young men [J]. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 2019, 17(3): 101-107.
- [51] SOKOŁOWSKA E, SADOWSKA A, SAWICKA D, et al. Car. A head-to-head comparison review of biological and toxicological studies of isomaltulose, D-tagatose, and trehalose on glycemic control [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 62(21): 21-26.
- [52] HWANG D, PARK H R, LEE S J, et al. Oral administration of palatinose vs sucrose improves hyperglycemia in normal C57BL/6 J mice [J]. *Nutrition Research*, 2018, 59(7): 44-52.
- [53] MATEO G R, PÉREZ C S, LAMIQUIZ M I, et al. Effect of an alcohol-free beer enriched with isomaltulose and a resistant dextrin on insulin resistance in diabetic patients with overweight or obesity [J]. *Clinical Nutrition*, 2020, 39(2): 475-483.
- [54] SCOTT K P, GRIMALDI R, CUNNINGHAM M, et al. Developments in understanding and applying prebiotics in research and practice—an ISAPP conference paper [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2020, 128(4): 934-949.
- [55] SU H H, XU R Y, YANG Z D, et al. Green synthesis of isomaltulose from cane molasses by an immobilized recombinant *Escherichia coli* strain and its prebiotic

- activity [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143(3): 1-9.
- [56] YANG Z D, GUO Y S, HUANG J S, et al. Isomaltulose exhibits prebiotic activity, and modulates gut microbiota, the production of short chain fatty acids, and secondary bile acids in rats [J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2464-2464.
- [57] L M J, O S G, SRDJAN L, et al. Awareness among us adults of dental sealants for caries prevention [J]. *Preventing Chronic Disease*, 2019, 3: 16-29.
- [58] HAMADA S. Role of sweeteners in the etiology and prevention of dental caries [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2013, 74(7): 1293-1300.
- [59] ZIHAN Z, SHENGNAN Y, LUWEN C, et al. Isomaltulose alleviates acute colitis via modulating gut microbiota and the Treg/Th17 balance in mice [J]. *Food & Function*, 2022, 13(16): 8572-8584.
- [60] 傅浩,魏嘉禾,蔡俊挺,等.低碳水化合物饮食对糖尿病影响的研究进展[J].*糖尿病新世界*,2021,24(16):194-198.
- [61] 郭春秀,熊钰,王双芹.适用于糖尿病的全营养配方食品与饮食护理的研究进展[J].*食品安全质量检测学报*,2020, 11(14):4562-4567.
- [62] HADJIKINOVA R D. Comparative characteristics of instant creams with sugar and isomaltulose [J]. *IOP Conference Series:Materials Science and Engineering*, 2021, 1031(1): 012102-012102.
- [63] 凌海波.一种在常温下保持高活菌数的发酵乳的制备方法:中国,CN101273736[P].2008-10-01.
- [64] GB 2760-2014,食品添加剂使用标准[S].
- [65] 贾英民等编著.酶工程技术及其在农产品加工中应用[M].北京:中国轻工业出版社,2020.
- [66] OJEU. Commission Decision under Regulation [DB/OL]. (2005-07-25). Link: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005D0581&from=EN>.
- [67] OJEU. Commission Implementing Regulation [DB/OL]. (2017-12-20). Link: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R2470&from=EN>.
- [68] U.S.FD. GRAS Notice No. 184-Isomaltulose [DB/OL]. (2006-03-20). Link: https://www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/?set=GRASNotices&id=184&sort=GRN_No&order=D ESC&startrow=1&type=basic&search=isomaltulose.
- [69] GC. Health Canada Directory of Novel Foods that Have Completed Safety Assessments [DB/OL]. (2022-07-22). Link: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/genetically-modified-foods-other-novel-foods/approved-products.html#tae>.
- [70] FRL. Food Standards Code-Schedule 25 Permitted novel food [DB/OL] (2023-01-15). Link: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2021C00564>.