

专家论坛专栏

编者按:糖醇和稀有糖是具有潜力替代蔗糖的功能性糖。这类功能性糖在人体内的吸收和代谢速度相对较慢,能够减缓血糖上升的速度,降低胰岛素的分泌,从而减少脂肪的积累。尽管这类功能性糖的生理活性已经被证实,但复杂的高成本的生物合成技术仍然是制约其广泛应用的主要因素。本期栏目特约专家以异麦芽酮糖醇和 D-塔格糖为例,阐述了功能性糖的生理活性、生物合成技术研究进展,以期为更多功能性糖结构及功能活性研究提供思路,为开发低糖或无糖功能食品提供有益借鉴。

(栏目策划:李 宁)

doi:10.12031/spxb202300564

文章编号:2095-6002(2023)06-0009-11

引用格式:金利群, 沈骥冬, 柳志强, 等. 异麦芽酮糖醇的生理活性及生物合成研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(6):9-19.



JIN Liqun, SHEN Jidong, LIU Zhiqiang, et al. Research progress on physiological activity and biosynthesis of isomalt[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(6):9-19.

异麦芽酮糖醇的生理活性及生物合成研究进展

金利群, 沈骥冬, 柳志强*, 郑裕国

(浙江工业大学 生物工程学院/手性生物制造国家地方联合工程研究中心/浙江省生物有机合成重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘 要:异麦芽酮糖(又称“帕拉金糖”)是由1分子葡萄糖和1分子果糖以 α -1,6糖苷键连接形成的还原型二糖,将异麦芽酮糖氢化还原后可以制得异麦芽酮糖醇(又称“帕拉金糖醇”),是国际上新兴的功能性食用糖醇。异麦芽酮糖醇是1种包含2种立体异构体即 α -D-吡喃葡萄糖基-(1,6)-D-山梨醇(GPS)和 α -D-吡喃葡萄糖基-(1,1)-D-甘露醇二水合物(GPM)的白色晶状混合物。根据GPS和GPM比例的不同,主要有ISOMALT ST、ISOMALT GS、ISOMALT DC和ISOMALT LM 4种不同的产品。异麦芽酮糖醇是迄今为止唯一完全由蔗糖衍生获得的二元糖醇,其口感近似于蔗糖,甜度约为蔗糖的45%,热值为蔗糖的50%,具有化学性质稳定、不致龋齿、摄取后不会导致血糖和胰岛素水平波动等优点,可以作为蔗糖的健康替代品。对异麦芽酮糖醇的生理功能、工业制造及应用现状进行了梳理,系统介绍了异麦芽酮糖醇的制造工艺路线(生物催化法和加氢还原技术),并重点介绍了异麦芽酮糖醇生物合成过程的关键酶——蔗糖异构酶的结构、催化机理和分子改造等方面的研究进展,以期对相关研究工作的开展和工业化生产提供指导。

关键词:甜味剂;功能性糖醇;异麦芽酮糖醇;蔗糖异构酶;化学加氢

中图分类号: TS202.3

文献标志码: A

收稿日期:2023-08-29

基金项目:浙江省“万人计划”科技创新领军人才项目(2022R52041)。

Foundation: Scientific and Technological Innovation Leading Talents Program of “Ten-Thousand People Plan” of Zhejiang (2022R52041).

第一作者:金利群,女,教授,博士,主要从事合成生物学、生物催化与转化方面的研究。

*通信作者:柳志强,男,教授,博士,主要从事合成生物学、生物催化与转化方面的研究。

蔗糖凭借其不同于化学合成甜味剂的优越性能,不仅成为食品工业中不可或缺的甜味剂,还有助于食品本身品质的提高以及食品生产工艺的优化,但是蔗糖也存在致龋齿性、热量高等缺点^[1],如果长期大量摄入则会损害人体健康并诱发如糖尿病等疾病^[2]。近年来,全球糖尿病(其中 90% 是 2 型糖尿病)的患病率正在逐年增加,预计在 2045 年将达到 7 亿人,导致相关的医疗支出大幅增加(2021 年,糖尿病导致的全球卫生支出约为 9 660 亿美元,相比 2019 年增长 27.1%),并严重影响患病人群的生活质量^[3]。糖尿病是一种多因素引发的疾病,其中最相关的因素是食用过量的含糖食品^[4-5]。因此,开发新型甜味剂作为蔗糖替代品成为食品工业的研究热点之一。

目前,针对糖尿病患者推出的含功能性糖醇加工食品越来越受到市场的青睐^[6-7]。功能性糖醇是糖的不饱和羰基和氢气发生加成反应后获得的多元醇化合物,根据其化学结构可分为单糖醇(如木糖醇、山梨糖醇、甘露糖醇等)和多糖醇(如异麦芽酮糖醇、麦芽糖醇、乳糖醇等)^[7-8]。大多数功能性糖醇是白色的水溶性固体,自然界含量很少,存在于一些果蔬中,在工业生产中通过糖加氢反应获得^[9]。由于其功能特性,功能性糖醇已被广泛应用于多个领域,在食品和饮料领域中常被用作蔗糖的替代品^[10],在烘焙食品、无糖糖果、口香糖、冰淇淋、风味饮料等不同食品中有重要应用^[11-13]。在医药领域,功能性糖醇被广泛用于口腔和牙科护理产品^[14-15],可以促进益生菌增殖、加快肠道蠕动、有助于维护肠道功能正常化^[16-17],且具有一定的抗菌特性^[18]。此外,功能性糖醇在化工、农业等领域也有广泛应用,可以增加土壤微生物功能多样性和酶活性^[19],也可以用作螯合剂和杀虫剂^[20]。

异麦芽酮糖醇是近年来新兴的功能性食用糖醇,2008 年卫生部批准其为新资源食品,有益寿糖之称。因其具有溶解度低、不吸湿不潮解等特点,作为食品配料耐受性高,不易产生腹胀、肠鸣等不良反应,因此有希望成为蔗糖等传统甜味剂的理想的替代品之一。本文介绍了异麦芽酮糖醇的生理功能及应用,并阐述了两步法(生物催化法和加氢还原技术)在异麦芽酮糖醇合成过程中的研究进展,为相关研究工作的开展和工业化生产提供指导。

1 异麦芽酮糖醇的生理活性

异麦芽酮糖(isomaltulose)是由一分子葡萄糖和一分子果糖以 α -1,6 糖苷键连接形成的还原型二糖,将异麦芽酮糖氢化还原后可以制得异麦芽酮糖醇(isomalt),是国际上新兴的功能性食用糖醇。异麦芽酮糖和异麦芽酮糖醇最早是由德国南德制糖公司制得并生产,因此商业名称为帕拉金糖(palatinose)和帕拉金糖醇(palatinit)^[21]。异麦芽酮糖和糖醇在自然界中的分布极其稀少,目前仅在天然蜂蜜中发现少量的异麦芽酮糖^[22],故难以从天然产物中分离提取并利用。

异麦芽酮糖醇是 1 种包含 2 种立体异构体即 α -D-吡喃葡萄糖基-(1,6)-D-山梨醇(GPS)和 α -D-吡喃葡萄糖基-(1,1)-D-甘露醇二水合物(GPM)的白色晶状混合物。GPS 和 GPM 通过不同比例混合和加工,可以获得 ISOMALT ST [$m(\text{GPS}):m(\text{GPM})=1:1$]、ISOMALT GS [$m(\text{GPS}):m(\text{GPM})=3:1$]、ISOMALT DC(ST 型或 GS 型研磨后制得)和 ISOMALT LM(ST 型干燥后制得)4 种晶体性质不同的产品^[23]。异麦芽酮糖醇是迄今为止唯一完全由蔗糖衍生获得的二元糖醇,其甜味纯正,甜度约为蔗糖的 45%,热值为蔗糖的 50%,稍吸湿,熔点为 145~150℃。异麦芽酮糖醇能增强食品风味的传递,因此经常与非营养或营养甜味剂混合使用。对异麦芽酮糖醇的口感研究表明,异麦芽酮糖醇还能掩盖一些甜味剂和填充剂的苦味^[24]。由于结构不同,异麦芽酮糖醇与蔗糖的生理特性存在明显区别,相关研究表明异麦芽酮糖醇对维持人体健康有着积极的作用(图 1)。

1.1 异麦芽酮糖醇在消化吸收方面的生理活性

异麦芽酮糖醇的糖苷键稳定,难以被水解。研究表明,异麦芽酮糖醇进入人体消化道后仅有少部分(10%左右)被水解为山梨醇、甘露醇和葡萄糖,其中葡萄糖快速被消化道吸收,而山梨醇和甘露醇在小肠中被部分吸收。90% 的异麦芽酮糖醇在食入后会完整进入结肠,并参与肠道菌群的代谢活动,因此具备低消化的特性^[25]。研究表明,人体在连续 4 周每天服用 30 g 异麦芽酮糖醇后没有出现明显的不良反应,其肠道菌群的数量、种类和生理功能相比服用蔗糖的人群发生明显改变。与服用蔗糖相比,食用异麦芽酮糖醇的受试者的

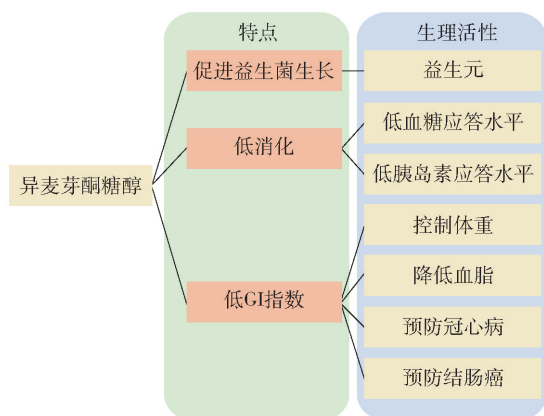


图1 异麦芽酮糖醇的主要生理功能

Fig. 1 Main physiological function of isomalt

肠道菌群中双歧杆菌的数量和比例分别增加 47% 和 65%; 肠道微生物的 β -葡萄糖苷酶活力降低 40%。体外研究证明, 异麦芽酮糖醇能够被部分双歧杆菌利用产生高浓度的丁酸, 为肠道微生物提供了良好的代谢原料, 能够促进益生菌的生长, 具有益生元的功能^[26]。

1.2 异麦芽酮糖醇在血糖和体重控制方面的生理活性

血糖生成指数 (glycemic index 或 glycaemic index, GI) 能够反映某一食品引发人体血糖升高多少, 是评价食品的一种生理学参数。一般认为, 指数小于 55 的是低 GI 食物^[27], 食用低 GI 食物可以降低葡萄糖的吸收效率进而降低胰岛素浓度峰值和胰岛素总需求量, 改善胰岛素的敏感性^[28]。异麦芽酮糖醇的 GI 值在 2 ~ 12, 人体摄入后血糖应答平缓, 升高幅度远低于摄入葡萄糖, 不会引发胰岛素的显著提高^[29]。此外, 异麦芽酮糖醇属于低消化性碳水化合物, 在消化道中吸收缓慢, 使体内血糖和胰岛素的含量维持在适度的水平且变化相对平缓, 避免发生血糖水平过低的情况, 延长饱腹感持续时间, 有利于控制饮食, 减少不必要的营养摄入。异麦芽酮糖醇的能量值约为大多数碳水化合物的一半, 仅为 8 kJ/g, 这种低能量值以及低血糖、胰岛素应答水平的特性使其有利于体重的控制。

1.3 异麦芽酮糖醇在预防心血管疾病方面的生理活性

根据大量流行病学的研究, 在控制已知和可疑危险因素后, 食入低 GI 食物能降低冠心病的发病率。与食入高 GI 食物人群相比, 低 GI 饮食可以使

合并高脂血症糖尿病患者的血清总胆固醇浓度降低 19.3%, 甘油三酯浓度降低 9.1%, 低密度脂蛋白胆固醇浓度降低 8.8%^[30]。非糖尿病人群在食入低 GI 饮食后, 体内甘油三酯和胆固醇水平降低, 总脂肪组织减少, 并在总体质量不变的情况下增加了瘦体质量成分^[31]。横断面研究显示, GI 与高密度脂蛋白胆固醇水平呈负相关关系。因此, 异麦芽酮糖醇的低血糖应答特性有利于延缓糖尿病人心血管疾病的发生。

1.4 异麦芽酮糖醇在预防结肠癌方面的生理活性

相关研究表明, 能够引发高胰岛素血症或者胰岛素抵抗的因素都将增加结肠癌的发病率。摄入高 GI 食物会增加血糖、胰岛素水平升高幅度, 与结肠癌的发生呈正相关关系, 增加习惯久坐人群或肥胖妇女患结肠癌的风险^[11]。异麦芽酮糖醇摄入人体后能有效控制血糖、胰岛素水平, 并在消化道内发酵产生丁酸, 维持肠道内酸性环境, 促进益生菌迅速增殖, 清除肠道有害物质, 有益于预防结肠癌的发生。

异麦芽酮糖醇化学性质稳定, 不易发生美拉德反应, 不会影响食品的色泽外观, 耐酸耐碱能力强, 且难以被微生物利用, 非常利于保存。异麦芽酮糖醇容易从过饱和溶液中结晶, 适合应用于无糖食品和药品包衣的制作^[23]。其在人体内很少被吸收, 基本不参与生理代谢, 也不会导致血糖和胰岛素水平波动, 肥胖人群和糖尿病患者也可安全食用。因此, 异麦芽酮糖醇常作为食品配料加入各种低糖食品中。人体对异麦芽酮糖醇还具有很好的耐受性。此外, 异麦芽酮糖醇还可以被人体肠道中的双歧杆菌所分解利用, 促进肠道菌群的繁殖生长, 从而维持肠道微生态平衡, 对人体健康有益。随着人们对低热量和无糖食品的越发青睐, 异麦芽酮糖醇的市场需求量必将不断扩大^[32]。

2 异麦芽酮糖醇的生物合成方法

异麦芽酮糖醇的生产过程包括 2 个步骤。第一步, 蔗糖异构酶重新排列蔗糖中葡萄糖和果糖分子之间的糖苷键, 从而生成更加稳定的异麦芽酮糖。第二步, 异麦芽酮糖中的果糖部分发生加氢反应, 生成异麦芽酮糖醇 (图 2)^[32]。

2.1 蔗糖异构酶的生物合成

蔗糖异构酶 (sucrose isomerase, SIase, EC 5.4.

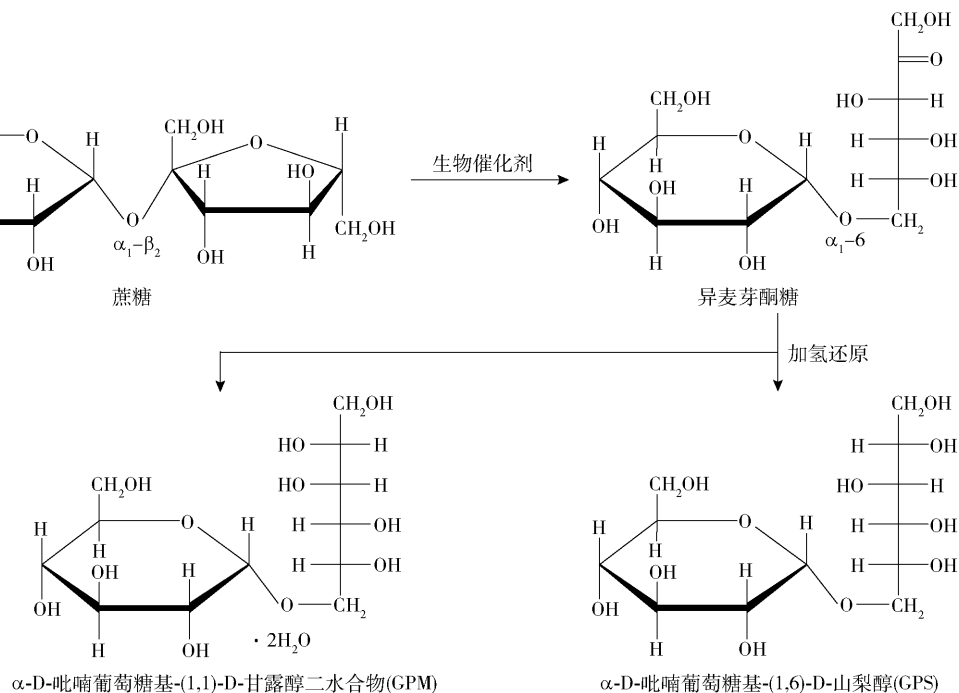


图2 异麦芽酮糖醇的合成路线

Fig. 2 Synthetic route of isomalt

99.11) 又称 α -葡萄糖基转移酶、异麦芽酮糖合成酶等,能催化蔗糖中的 α -1,2 糖苷键发生重排。根据重排反应的不同主要得到异麦芽酮糖(重排成 α -1,6 糖苷键)和海藻酮糖(重排成 α -1,4 糖苷键)2 种蔗糖同分异构体。此外,在催化过程中还存在部分糖苷水解反应,因而粗产品中还存在果糖和葡萄糖这两种副产物^[33]。

2.1.1 蔗糖异构酶的来源和异源表达

已报道的蔗糖异构酶大部分来源于微生物,根据产物的不同可以分为异麦芽酮糖主产型(异麦芽酮糖产率为 70% ~ 85%)和海藻酮糖主产型(海藻酮糖产率为 85% ~ 95%)。异麦芽酮糖主产型蔗糖异构酶主要来源于 *Erwinia rhapsontici*、*Protaminobacter rubrum*^[34]、*Serratia plymuthica*、*Klebsiella* sp. 等。而海藻酮糖主产型主要来源于 *Agrobacterium radiobacter*、*Pseudomonas mesoacidophila* 等。此外,研究发现银叶粉虱来源的海藻酮糖型蔗糖异构酶(产物只有海藻酮糖),其蛋白结构与常见的微生物来源的蔗糖异构酶不同^[35]。

为了提高蔗糖异构酶的表达效率以更好地应用于工业生产异麦芽酮糖,研究者们克隆蔗糖异构酶基因至不同宿主细胞中进行异源表达。Mattes 等^[34]首次实现 *P. rubrum* CBS574.77 来源的蔗糖异

构酶于大肠杆菌中异源表达,来源于 *P. dispersa* UQ68J、*K. planticola* UQ14S 和 *E. rhapsontici* WAC2928 的蔗糖异构酶,利用 T7 表达系统于大肠杆菌中,实现可溶性表达^[36]。随着其他宿主异源表达技术的逐渐成熟^[37]。蔗糖异构酶作为一种食品酶,也有研究者专注于将 *Saccharomyces cerevisiae* 和 *Lactococcus lactis* (食品安全菌)作为蔗糖异构酶的表达宿主。Park 等^[38]利用自诱导启动子 P170 和优化的信号肽 SP310mut2,成功在 *Lactococcus lactis* MG1363 中分泌表达来自肠杆菌属的蔗糖异构酶基因。Lee 等^[39]利用 GAL1-10 启动子和糖基磷脂酰肌醇(GPI)锚定附着信号序列,成功在 *Saccharomyces cerevisiae* EBY100 细胞表面展示了来自肠杆菌属的蔗糖异构酶。

2.1.2 蔗糖异构酶的结构和催化机理

许多不同来源的蔗糖异构酶已成功获得其蛋白晶体结构并解析^[40],主要有来源于 *Klebsiella* sp. LX3 (PDB: 1M53)、*P. rubrum* CBS574.77 (PDB: 3GBD)、*P. mesoacidophila* MX-45 (PDB: 1ZJA) 和 *E. rhapsontici* NX-5 (PDB: 4HOW)^[41]。晶体结构分析表明,蔗糖异构酶是单亚基分子,其结构与糖苷水解酶 13 家族(GH13)类似,主要由 N 端(β/α)₈ 桶状结构域、C 端结构域和亚结构域组成。其中,

(β/α)₈ 桶状结构域是其催化中心,位于亚结构域和 C 端结构域之间,含有 3 个与催化反应相关 (Asp241、Glu295 和 Asp369) 和 2 个参与酶和底物结合 (His145 和 His368) 的保守氨基酸残基^[42]。其中 Asp241、Glu295 和 Asp369 这 3 个氨基酸与催化有关,另外 2 个则与酶和底物的结合有关。C 端结构域由 2 个反平行的 β -折叠组成,具有稳定蛋白结构的功能;亚结构域参与底物的结合。Ravaud 等^[43] 研究了蔗糖异构酶的催化机理,推测其催化过程采用两步双位移机制:利用酶催化中心形成的羰基离子过渡态完成糖基-酶中间复合物共价键的形成与断裂。其中谷氨酸残基为质子供体,使糖苷键上的氧质子化,催化蔗糖的水解。随后天冬氨酸亲核攻击蔗糖的 C1 氢原子使其去质子化,形成 β -葡萄糖基-酶复合物。最后游离果糖基可通过互变异构形成产物异麦芽酮糖和海藻酮糖。

表 1 不同来源蔗糖异构酶的酶学性质和动力学参数

Tab. 1 Enzymatic properties and kinetic parameters of sucrose isomerase from different sources

来源	比酶活/(U·mg ⁻¹)	最适温度/℃	K _m /(mmol·L ⁻¹)	(k _{cat} /K _m)/(s ⁻¹ ·mmol ⁻¹ ·L)	参考文献
<i>E. rhapontici</i> NX-5	NR	30	257	NR	[46]
<i>Erwinia</i> sp. D12	19. 8	40	138	NR	[47]
<i>Enterobacter</i> sp. FMB-1	NR	50	49	NR	[48]
<i>K. pneumonia</i> NK33-98-8	2 362	35	42. 7	NR	[49]
<i>P. dispersa</i> UQ68J	562	35	40	17. 9	[50]
<i>K. planticola</i> UQ14S	351	35	76	6. 2	[51]
<i>Klebsiella</i> sp. LX3	328	35	54. 6	0. 27 min ⁻¹ ·mmol ⁻¹ ·L	[52]
<i>Klebsiella</i> sp.	NR	35	120	NR	[53]
<i>P. mesoacidophila</i> MX-45	13. 9	20	19. 2	NR	[45]

NR 为未报道。

2. 1. 4 蔗糖异构酶的分子改造

从自然环境中挖掘获得的蔗糖异构酶的催化活性偏低,难以满足工业化生产异麦芽酮糖的需求。因此,工业生产中采用酶工程获得性能更好的蔗糖异构酶。目前,研究人员对蔗糖异构酶的分子改造已经进行了大量的研究,并获得了能显著提高异麦芽酮糖产量的蔗糖异构酶突变体(表 2^[54-57])。此外,也有研究者通过分子改造提高蔗糖异构酶的热稳定性以提高其工业化应用性能。Zhang 等^[52] 利用脯氨酸效应对来源于 *Klebsiella* sp. LX3 的蔗糖异构酶进行改造后,突变体 E498P/R310P 在 50 ℃ 下半衰期是天然酶的 11 倍。Duan 等^[54] 通过基于 B 因子的定点突变对蔗糖异构酶进行改造,突变体

2. 1. 3 蔗糖异构酶的酶学性质

1984 年,Cheetham 首次利用 *Erwinia rhapontic* 菌体催化蔗糖得到异麦芽酮糖,并从细胞中分离提取得到蔗糖异构酶(4. 1 U/mg),确定异麦芽酮糖是由蔗糖异构酶所催化合成的^[44]。对不同来源的蔗糖异构酶进行酶学性质研究发现(表 1^[45-53]),蔗糖异构酶的最适反应温度大部分在 20 ~ 40 ℃,并且大部分蔗糖异构酶的热稳定性较差,当温度超过 45 ℃ 时极易失活;最适 pH 值处于 5. 0 ~ 6. 0 的范围内,且该酶对 pH 值变化敏感。虽然不同微生物来源的蔗糖异构酶的同源性很高,但是其中部分酶学性质还是存在显著的差异,例如来源于 *P. mesoacidophila* MX-45 的蔗糖异构酶的底物亲和力较高(K_m 值为 19. 2 mmol/L)^[45],而来源于 *E. rhapontici* NX-5 的蔗糖异构酶的 K_m 值为 257 mmol/L^[46]。

表 2 具有提高异麦芽酮糖产量的 SIase 突变体

Tab. 2 SIase variants with improved isomaltulose production

来源	突变体	转化 提高	参考
		率/% 率/%	文献
<i>S. plymuthica</i> AS9	E175N/K576D	78. 4 2. 8	[54]
<i>Rhizobium</i> sp.	F164L	21. 1 55. 1	[55]
<i>P. dispersa</i> UQ68J	Q299E	94. 2 4. 3	[56]
<i>S. plymuthica</i>	Y219L/D398G/V465E	94. 7 18. 4	[57]
<i>Klebsiella</i> sp.	E498P/R310P	84. 8 35. 0	[52]

E175N、K576D 和 E175N/K576D 的最适温度比天然酶提高了 5 ℃,热稳定性也不同程度提高。目前,国内外虽有不少关于蔗糖异构酶的研究,但大都还是

停留在实验室水平,关于蔗糖异构酶工业化应用方面的研究,还需要进一步地深入。

2.2 异麦芽酮糖的生物合成

异麦芽酮糖醇生产的第一步主要是微生物转化法,其中微生物转化法又可以细分为游离细胞转化法和固定化细胞转化法。游离细胞转化法是一种细胞培养发酵与催化蔗糖转化反应同步进行的生产工艺。固定化细胞转化法则是通过将菌体静息细胞固定化后进行催化合成异麦芽酮糖^[58]。由于利用游离细胞转化蔗糖生产异麦芽酮糖后下游分离难度较大,难以应用于大规模的生产^[59]。在工业上通常使用固定化细胞的方法生产异麦芽酮糖,主要是由于其具备转化液分离纯化简便、生产能力强、细胞利用率高、菌体使用量少等优势。目前,据报道,通过完整的游离细胞催化蔗糖转化得到异麦芽酮糖这一方法最后的产率最高为 90%^[60],而通过固定化细胞的方法催化蔗糖转化得到异麦芽酮糖的最高产率可以达到 94%^[61]。

2.2.1 微生物转化法

在固定化技术发展成熟之前,一般采用游离细胞转化法合成异麦芽酮糖。Cho 等^[48]在 *Enterobacter* sp. FMB-1 细胞培养发酵过程中添加质量浓度为 4 g/L

的蔗糖,经培养 48 h 后,异麦芽酮糖最终的产量达到 90%。Huang 等^[51]利用 *Klebsiella planticola* CCRC19112 游离菌体对蔗糖转化后获得 76% ~ 84% 的异麦芽酮糖,但是这种方法存在较大的缺陷,由于蔗糖异构酶位于细胞的壁膜空间,蔗糖异构酶的活力不高,从而催化转化过程需要菌体的量巨大,而且后续分离纯化难度较大,所以难以应用于工业化的大规模生产。

2.2.2 固定化细胞转化法

固定化细胞相比游离细胞具有许多潜在的优势,如最小的下游处理量、可连续操作、显著提高了操作稳定性和生物催化剂的再利用水平等,因此固定化细胞转化法为异麦芽酮糖的重要合成工艺之一。根据细胞特有的性质可以选用适合的固定化方法,普遍采用的方法主要有吸附法、共价法、交联法和包埋法 4 种,此外还可以采用多种固定化方法联合使用的方式进行细胞的固定化。利用固定化细胞生产异麦芽酮糖已成为当前研究的一大热点,并取得了大量的成果(表 3^[63-69])。如使用壳聚糖与戊二醛交联固定化后的蔗糖异构酶全细胞,其半衰期最高达 155 d,同时转化率高达 94%,异麦芽酮糖累积产率为 1 488 kg·dm⁻³^[62]。

表 3 固定化细胞生产异麦芽酮糖
Tab. 3 Isomaltulose production by immobilized cells

方法	菌株	转化率/%	异麦芽酮糖产率	稳定性	参考文献
藻酸盐包埋	<i>E. rhapsontici</i> NCPPB 1578	75	0.2 g·g ⁻¹ ·h ⁻¹ a	半衰期为 8 625 h	[63]
	<i>P. rubrum</i> CBS574. 77	82	1.6 g·g ⁻¹ ·h ⁻¹ b	—	[61]
	<i>P. rubrum</i> CBS574. 77	> 90	4.0 g·g ⁻¹ ·h ⁻¹ b	—	[61]
	<i>Erwinia</i> sp. D12	50 ~ 60	—	稳定催化 7 批次以上	[64]
	<i>Erwinia</i> sp. D12	53 ~ 59	—	活性保持 480 h	[65]
	<i>E. coli</i>	86	—	活性保持 30 d	[46]
	<i>E. coli</i>	83 ~ 86	0.4 g·g ⁻¹ ·h ⁻¹ b	活性保持 40 d	[66]
	<i>Klebsiella</i> sp. LX3	> 87	522.8 mg·min ⁻¹	—	[60]
	<i>E. rhapsontici</i> NCPPB 1578	—	140 g·L ⁻¹ ·h ⁻¹	—	[67]
	<i>Klebsiella</i> sp. K18	约 62.5	—	—	[53]
中空纤维膜共价结合	<i>S. plymuthica</i> ATCC15928	70 ~ 81	—	活性保持 7 d	[68]
	<i>S. plymuthica</i> ATCC15928	>90	16.8 g·m ⁻² ·h ⁻¹	半衰期为 42 d	[69]
壳聚糖交联	<i>S. plymuthica</i> ATCC15928	94	1 488 kg·dm ⁻³ c	半衰期为 155 d	[62]

—表示未报道,a 表示结果以细胞质量计,b 表示结果以球团质量计,c 表示结果以生物催化剂计。

2.3 异麦芽酮糖的加氢还原

异麦芽酮糖醇生产的第二步反应则需要在高温高压条件和加氢催化剂(如雷尼镍催化剂等)的

作用下进行加氢反应,制得异麦芽酮糖醇。雷尼镍是目前糖醇制备中应用最广泛的金属加氢催化剂,它通常是通过超碱蚀法处理 Ni-Al 合金得到的

具有多孔结构的细小固体粉末,主要由镍构成。这种多孔结构,使其具有较大的比表面积,有效提高了它的催化性能。闫传浩等利用雷尼镍在100~130℃和5~13 MPa氢气压力下,对第一步反应后的反应液净化提纯后进行加氢反应,反应结束后异麦芽酮糖醇占比84%~92%,山梨醇6%~10%,甘露醇1%~2%。利用骨架镍催化剂和镍-酮催化剂混合物在110~120℃和0.5~0.7 MPa氢气压力下,催化50%~70%异麦芽酮糖加氢制备异麦芽酮糖醇,加氢反应1 h内,异麦芽酮糖转化率大于99.8%。然而雷尼镍需要在较为苛刻的反应条件下进行催化加氢,这不仅提高了生产成本,还易使催化剂发生烧结,加速了催化剂的失活,此外雷尼镍催化剂的稳定性较差,表面的Ni金属易浸出,不仅降低了催化剂的活性,还使产物的分离纯化变得更加困难。近年来,负载型金属催化剂展现出良好的加氢活性及稳定性,在糖醇的绿色制备中应用越来越广泛^[70]。

3 异麦芽酮糖醇的应用

异麦芽酮糖醇的发现和應用源于20世纪90年代后期的欧洲^[71]。基于其特性,异麦芽酮糖醇在食品和制药工业的许多应用中是理想的代糖。异麦芽酮糖醇具有的卓越口感风味和保质期卓越特性使其在“无糖”食品加工领域成为首选。在生产工艺方面,市场中现有的加工设备可以不经重大修改应用于所有含异麦芽酮糖醇制品的生产。但在某些情况下,建议对生产配方和工艺参数稍加修改。其中ISOMALT ST型异麦芽酮糖醇在包装食品、口香糖、巧克力和无糖硬糖方面的应用表现出优异的性能。

使用ISOMALT ST型异麦芽酮糖醇可以生产各种无糖夹心糖果,其生产过程与以蔗糖和葡萄糖浆为原料的糖果非常相似。但是相比蔗糖和葡萄糖浆,异麦芽酮糖醇具有溶解度低、沸点高、熔体黏度低和比热容高的特性^[72]。因此,在生产异麦芽酮糖醇硬糖的过程中,无论是批量生产还是连续生产,需要对配方和加工过程进行微小的调整。此外,异麦芽酮糖醇糖果的吸水性很稳定,且当糖果成品中的含水量低于2%时可以获得更长的保质期。

ISOMALT LM型异麦芽酮糖醇巧克力已经在

市场上展现出其他无糖巧克力无法比拟的卓越的品质,并且食用ISOMALT LM巧克力没有其他代糖食品特有的清凉的口感。此外,异麦芽酮糖醇因其具有低血糖和低胰岛素效应,有助于无糖食品的制造。

利用低沸点技术可以使用ISOMALT GS型异麦芽酮糖醇代替蔗糖生产软糖。但是所有的代糖都不能像蔗糖一样自发结晶,需要添加种子晶体作为结晶引发剂。此外,使用ISOMALT GS制作的水果酱的质量在味道、稠度、外观和卡路里含量方面都得到了非常积极的评价。由于ISOMALT GS能在酸性环境中保持稳定,因此其胶凝性能优于蔗糖。

ISOMALT ST-PF型异麦芽酮糖醇具有低溶解度和较好的增甜特性,可以应用于口香糖的生产。其低溶解度可使异麦芽酮糖醇在口香糖团块中保持结晶形式,使得口香糖在储存过程中不容易硬化;而低溶解度的特性在延长风味和甜味释放方面具有更持久的效果。最近的研究结果表明,用异麦芽酮糖醇代替全部甘露醇和部分山梨糖醇可以提高口香糖稳定性。

ISOMALT DC型异麦芽酮糖醇是一种具有良好的流动性,具有狭窄的粒度分布,没有变黏的趋势的可压缩粉末,可以利用传统机器直接压缩制造“无糖”糖果或非处方(OTC)片剂。ISOMALT DC具有2种变体,分别是基于ISOMALT ST制成的ISOMALT DC 100和基于ISOMALT GS制成的ISOMALT DC 200。2种变体具有相似的抗压强度,但是与ISOMALT DC 100相比,ISOMALT DC 200的表面更光滑,风味和药物释放更快。ISOMALT DC在生产应用中高度灵活,可以生产几乎任何所需硬度和溶解特性的片剂。此外,ISOMALT DC的另一个突出优点就是不会产生非必要的清凉口感并增强各种风味。

4 总结与展望

多年来,人们对使用功能性糖醇作为糖替代品的关注度越来越高。异麦芽酮糖醇是唯一一种完全由蔗糖衍生制得的功能性代糖。由于其理化和生理特性,可以作为基本食品添加剂应用于无糖、低卡路里、防龋齿等各种高附加值食品的加工。此外,异麦芽酮糖醇的口感与蔗糖近似,基于异麦芽酮糖醇加工的食品与传统食品几乎没有区别,生产商无须改

变生产线直接使用现有的生产加工设备制造巧克力、烘焙食品、谷类制品和“无糖”糖果等含异麦芽酮糖醇食品。因此,异麦芽酮糖醇是一种理想的甜味剂,可作为代糖应用广泛,其特性可满足消费者对美味、健康、保质期长的产品的需求。

参考文献:

- [1] LIU L N, BILAL M, LUO H Z, et al. Studies on biological production of isomaltulose using sucrose isomerase: current status and future perspectives[J]. Catalysis Letters, 2021, 151(7): 1868–1881.
- [2] SHYAM S, RAMADAS A, CHANG S K. Isomaltulose: recent evidence for health benefits[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 48: 173–178.
- [3] BOMMER C, SAGALOVA V, HEESEMANN E, et al. Global economic burden of diabetes in adults: projections from 2015 to 2030[J]. Diabetes Care, 2018, 41(5): 963–970.
- [4] ZHENG Y, LEY S H, HU F B. Global aetiology and epidemiology of type 2 diabetes mellitus and its complications[J]. Nature Reviews Endocrinology, 2018, 14(2): 88–98.
- [5] ERICKSON S, CARR J. The technological challenges of reducing the sugar content of foods[J]. Nutrition Bulletin, 2020, 45(3): 309–314.
- [6] WOLEVER T, PIEKARZ A, HOLLANDS M, et al. Sugar alcohols and diabetes: a review [J]. Canadian Journal of Diabetes, 2002, 26(4): 356–362.
- [7] 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.
- [8] MOON H J, JEYA M, KIM I W, et al. Biotechnological production of erythritol and its applications[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(4): 1017–1025.
- [9] GODSWILL A C. Sugar alcohols: chemistry, production, health concerns and nutritional importance of mannitol, sorbitol, xylitol, and erythritol [J]. International Journal of Advanced Academic Research, 2017, 3(2): 31–66.
- [10] RONDA F, GÓMEZ M, BLANCO C A, et al. Effects of polyols and nondigestible oligosaccharides on the quality of sugar-free sponge cakes[J]. Food Chemistry, 2005, 90(4): 549–555.
- [11] IBRAHIM O O. Sugar alcohols: chemical structures, manufacturing, properties and applications[J]. Journal of Nutrition & Food Sciences, 2016, 6(5): 817–824.
- [12] BELITZ H D, GROSCH W, SCHIEBERLE P. Food Chemistry [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2008.
- [13] RUNNEL R, MÄKINEN K K, HONKALA S, et al. Effect of three-year consumption of erythritol, xylitol and sorbitol candies on various plaque and salivary caries-related variables [J]. Journal of Dentistry, 2013, 41(12): 1236–1244.
- [14] RICE T, ZANNINI E, K ARENDT E, et al. A review of polyols-biotechnological production, food applications, regulation, labeling and health effects[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(12): 2034–2051.
- [15] KÖLJALG S, SMIDT I, CHAKRABARTI A, et al. Exploration of singular and synergistic effect of xylitol and erythritol on causative agents of dental caries[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 6297.
- [16] CHEN C L, LI L J, WU Z W, et al. Effects of lactitol on intestinal microflora and plasma endotoxin in patients with chronic viral hepatitis [J]. Journal of Infection, 2007, 54(1): 98–102.
- [17] GRABITSKE H A, SLAVIN J L. Low-digestible carbohydrates in practice[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2008, 108(10): 1677–1681.
- [18] WEISSMAN J D, FERNÁNDEZ F, HWANG P H. Xylitol nasal irrigation in the management of chronic rhinosinusitis[J]. The Laryngoscope, 2011, 121(S5): 367.
- [19] YU H L, SI P, SHAO W, et al. Response of enzyme activities and microbial communities to soil amendment with sugar alcohols [J]. Microbiology Open, 2016, 5(4): 604–615.
- [20] BILAL M, XU S, IQBAL H M N, et al. *Yarrowia lipolytica* as an emerging biotechnological chassis for functional sugars biosynthesis[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(4): 535–552.
- [21] MAKI Y, OHTA K, TAKAZOE I, et al. Acid production from isomaltulose, sucrose, sorbitol, and xylitol in suspensions of human dental plaque [J]. Caries Research, 1983, 17(4): 335–339.
- [22] PEINADO I, ROSA E, HEREDIA A, et al. Use of isomaltulose to formulate healthy spreadable strawberry products. Application of response surface methodology [J]. Food Bioscience, 2015, 9: 47–59.
- [23] 蒋金霞. 异麦芽酮糖醇及海藻糖溶解度实验测定方法与模型拟合研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- JIANG J X. Experimental determination methods and model fitting of solubility for isomalt and trehalose[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.

- [24] 王于齐. 蔗糖异构酶与铑基负载型催化剂的制备及在异麦芽酮糖醇合成中的应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2023.
- WANG Y Q. Preparation of a novel sucrose isomerase and Rh supported catalyst and the application in the synthesis of isomalt[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2023.
- [25] BOLHUIS G K, ENGELHART J J P, EISSENS A C. Compaction properties of isomalt[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2009, 72(3): 621–625.
- [26] GOSTNER A, BLAUT M, SCHÄFFER V, et al. Effect of isomalt consumption on faecal microflora and colonic metabolism in healthy volunteers[J]. *British Journal of Nutrition*, 2006, 95(1): 40–50.
- [27] MANN J, CUMMINGS J H, ENGLYST H N, et al. FAO/WHO scientific update on carbohydrates in human nutrition: conclusions[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2007, 61(1): 132–137.
- [28] STRATTON I M, ADLER A I, NEIL H A, et al. Association of glycaemia with macrovascular and microvascular complications of type 2 diabetes (UKPDS 35): prospective observational study [J]. *BMJ*, 2000, 321(7258): 405–412.
- [29] GEE J M, COOKE D, GORICK S, et al. Effects of conventional sucrose-based, fructose-based and isomalt-based chocolates on postprandial metabolism in non-insulin-dependent diabetics[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1991, 45(11): 561–566.
- [30] LIU S M, WILLETT W C, STAMPFER M J, et al. A prospective study of dietary glycemic load, carbohydrate intake, and risk of coronary heart disease in US women [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2000, 71(6): 1455–1461.
- [31] CLARA B, RIZKALLA SALWA W, JING L, et al. Five-week, low-glycemic index diet decreases total fat mass and improves plasma lipid profile in moderately overweight nondiabetic men[J]. *Diabetes Care*, 2002, 25(5): 822–828.
- [32] O'DONNELL K, KEARSLEY M W. Sweeteners and sugar alternatives in food technology[M]. 2nd ed. West Sussex: Blackwell Publishing Ltd, 2012.
- [33] SAWALE P D, SHENDURSE A M, MOHAN M S, et al. Isomaltulose (palatinose): an emerging carbohydrate [J]. *Food Bioscience*, 2017, 18: 46–52.
- [34] MATTES R, KLEIN K, SCHIWECK H, et al. DNA's encoding sucrose isomerase and palatinase [P]. 1998–07–28.
- [35] SALVUCCI M E. Distinct sucrose isomerases catalyze trehalulose synthesis in whiteflies, *Bemisia argentifolii*, and *Erwinia rhapontici* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2003, 135(2): 385–395.
- [36] WU L G, BIRCH R G. Characterization of the highly efficient sucrose isomerase from *Pantoea dispersa* UQ68J and cloning of the sucrose isomerase gene[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(3): 1581–1590.
- [37] HUO L J, HUG J J, FU C Z, et al. Heterologous expression of bacterial natural product biosynthetic pathways[J]. *Natural Product Reports*, 2019, 36(10): 1412–1436.
- [38] PARK J Y, JUNG J H, SEO D H, et al. Microbial production of palatinose through extracellular expression of a sucrose isomerase from *Enterobacter* sp. FMB-1 in *Lactococcus lactis* MG1363 [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(22): 8828–8833.
- [39] LEE G Y, JUNG J H, SEO D H, et al. Isomaltulose production via yeast surface display of sucrose isomerase from *Enterobacter* sp. FMB-1 on *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19): 9179–9184.
- [40] ZHANG D H, LI N, LOK S M, et al. Isomaltulose synthase (PalI) of *Klebsiella* sp. LX3[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2003, 278(37): 35428–35434.
- [41] XU Z, LI S, LI J, et al. The structural basis of *Erwinia rhapontici* isomaltulose synthase[J]. *PLoS One*, 2013, 8(9): e74788.
- [42] CARVALHO P H, KAWAGUTI H Y, SOUZA W F C, et al. Immobilization of *Serratia plymuthica* by ionic gelation and cross-linking with transglutaminase for the conversion of sucrose into isomaltulose [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2021, 44(6): 1109–1118.
- [43] RAVAUD S, ROBERT X, WATZLAWICK H, et al. Structural determinants of product specificity of sucrose isomerases [J]. *FEBS Letters*, 2009, 583(12): 1964–1968.
- [44] CHEETHAM P S. The extraction and mechanism of a novel isomaltulose-synthesizing enzyme from *Erwinia rhapontici* [J]. *The Biochemical Journal*, 1984, 220(1): 213–220.
- [45] NAGAI Y, SUGITANI T, TSUYUKI K I. Characterization of α -glucosyltransferase from *Pseudomonas mesoacidophila* MX-45 [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1994, 58(10): 1789–1793.
- [46] LI S, CAI H, QING Y J, et al. Cloning and characterization of a sucrose isomerase from *Erwinia rhapontici*

- NX-5 for isomaltulose hyperproduction [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, 163(1): 52–63.
- [47] KAWAGUTI H Y, CELESTINO É M, MORAES A L L, et al. Characterization of a glucosyltransferase from *Erwinia* sp. D12 and the conversion of sucrose into isomaltulose by immobilized cells[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, 48(2): 211–217.
- [48] 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*, 2007, 29(3): 453–458.
- [49] AROONNUAL A, NIHIRA T, SEKI T, et al. Role of several key residues in the catalytic activity of sucrose isomerase from *Klebsiella pneumoniae* NK33-98-8 [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, 40(5): 1221–1227.
- [50] WU L, BIRCH R G. Characterization of *Pantoea dispersa* UQ68J: producer of a highly efficient sucrose isomerase for isomaltulose biosynthesis[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2004, 97(1): 93–103.
- [51] HUANG J H, HSU L H, SU Y C. Conversion of sucrose to isomaltulose by *Klebsiella planticola* CCRC 19112 [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1998, 21(1): 22–27.
- [52] ZHANG D H, LI X Z, ZHANG L H. Isomaltulose synthase from *Klebsiella* sp. strain LX3: gene cloning and characterization and engineering of thermostability[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(6): 2676–2682.
- [53] ORSI D C, KAWAGUTI H Y, SATO H H. Glucosyltransferase production by *Klebsiella* sp. K18 and conversion of sucrose to palatinose using immobilized cells[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2009, 40(1): 66–72.
- [54] DUAN X G, CHENG S, AI Y X, et al. Enhancing the thermostability of *Serratia plymuthica* sucrose isomerase using B-factor-directed mutagenesis [J]. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0149208.
- [55] LIPSKI A, WATZLAWICK H, RAVAUD S, et al. Mutations inducing an active-site aperture in *Rhizobium* sp. sucrose isomerase confer hydrolytic activity [J]. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography*, 2013, 69(2): 298–307.
- [56] LIU H J, XING X Y, LU F P, et al. Functional modification of the substrate-binding site for isomaltulose production based on predicted structure of sucrose isomerase from *Pantoea dispersa* UQ68 J[C]//LIU H, SONG C, RAM A. *International Conference on Applied Biotechnology*. Singapore: Springer, 2018: 59–68.
- [57] PILAK P, SCHIEFNER A, SEIBOTH J, et al. Engineering a highly active sucrose isomerase for enhanced product specificity by using a “battleship” strategy[J]. *ChemBioChem*, 2020, 21(15): 2161–2169.
- [58] 张伟伟, 梁磊, 周正雄, 等. 蔗糖异构化生产新型甜味剂异麦芽酮糖的研究现状与前景展望[J]. *甘蔗糖业*, 2014(4): 32–37.
- ZHANG W W, LIANG L, ZHOU Z X, et al. Research status and prospects of isomaltulose production isomerized from sucrose [J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2014(4): 32–37.
- [59] 任贲, 李莎, 徐虹, 等. 蔗糖异构酶基因在 *Escherichia coli* BL21(DE3) 中的表达及重组菌的细胞固定化 [J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(6): 1–6.
- REN B, LI S, XU H, et al. Expression of sucrose isomerase in *Escherichia coli* BL21 (DE3) and the immobilization of recombinant [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 36(6): 1–6.
- [60] LI X, ZHAO C, AN Q, et al. Substrate induction of isomaltulose synthase in a newly isolated *Klebsiella* sp. LX3 [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2003, 95(3): 521–527.
- [61] DE OLIVA-NETO P, MENÃO P T P. Isomaltulose production from sucrose by *Protaminobacter rubrum* immobilized in calcium alginate[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(18): 4252–4256.
- [62] KRASTANOV A, BLAZHEVA D, YANAKIEVA I, et al. Conversion of sucrose into palatinose in a batch and continuous processes by immobilized *Serratia plymuthica* cells [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, 39(6): 1306–1312.
- [63] CHHETHAM P S J, GARRETT C, CLARK J. Isomaltulose production using immobilized cells [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1985, 27(4): 471–481.
- [64] KAWAGUTI H Y, CARVALHO P H, FIGUEIRA J A, et al. Immobilization of *Erwinia* sp. D12 cells in alginate-gelatin matrix and conversion of sucrose into isomaltulose using response surface methodology [J]. *Enzyme Research*, 2011, 2011: 1–8.
- [65] KAWAGUTI H Y, SATO H H. Production of isomaltulose obtained by *Erwinia* sp. cells submitted to different treatments and immobilized in calcium alginate [J]. *Ciência e Tecnologia De Alimentos*, 2011, 31(1): 257–263.
- [66] LI S, XU H, YU J G, et al. Enhancing isomaltulose production by recombinant *Escherichia coli* producing sucrose isomerase: culture medium optimization containing agricultural wastes and cell immobilization [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2013, 36(10): 1–10.

1395 – 1405.

[67]

MUNDRA P, DESAI K, LELE S S. Application of response surface methodology to cell immobilization for the production of palatinose [J]. Bioresource Technology, 2007, 98 (15) : 2892 – 2896.

[68]

DANIELA C O, HELIA H S. Isomaltulose production using free and immobilized *Serratia plymuthica* cells [J]. African Journal of Biotechnology, 2016, 15 (20) : 835 – 842.

[69]

KRASTANOV A, BLAZHEVA D, STANCHEV V. Sucrose conversion into palatinose with immobilized *Serratia plymuthica* cells in a hollow-fibre bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2007, 42 (12) : 1655 – 1659.

[70]

ZHANG X J, DOU B J, WANG Y Q, et al. Efficient synthesis of sugar alcohols using a composite trimetallic Pt-Ni-Sn/MWCNTs catalyst based on metal element co-ordination and valence regulation [J]. Food Bioscience, 2023, 53 : 102708.

[71]

NDINDAYINO F, HENRIST D, KIEKENS F, et al. Characterization and evaluation of isomalt performance in direct compression [J]. International Journal of Pharmaceutics, 1999, 189 (1) : 113 – 124.

[72]

FRITZSCHING B. Isomalt in hard candy applications [J]. Manufacturing Confectioner, 1995, 75 : 65 – 74.

Research Progress on Physiological Activity and Biosynthesis of Isomalt

JIN Liqun, SHEN Jidong, LIU Zhiqiang*, ZHENG Yuguo

(College of Biotechnology and Bioengineering/National and Local Joint Engineering Research Center for Biomanufacturing of Chiral Chemicals/Key Laboratory of Bioorganic Synthesis of Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Isomaltulose, also known as palatinose, is a reductive disaccharide formed by the α -1,6 glycosidic linkage of one glucose molecule and one fructose molecule. Isomalt (palatinit) can be obtained by hydrogenating and reducing isomaltulose and is an emerging functional edible sugar alcohol. Isomalt consists of two stereoisomers, α -D-pyranose glucose-(1, 6)-D-sorbitol (GPS), and α -D-pyranose glucose-(1, 1)-D-mannitol dihydrate (GPM), forming a white crystalline mixture. Depending on the ratio of GPS to GPM, isomalt can be classified into four primary products: ISOMALT ST, ISOMALT GS, ISOMALT DC, and ISOMALT LM. Isomalt is the only disaccharide sugar alcohol entirely derived from sucrose, with a taste profile resembling sucrose. It exhibits approximately 45% of the sweetness of sucrose and provides 50% of its calorific value. Notably, isomalt offers advantages such as chemical stability, non-cariogenic properties, and minimal impact on blood glucose and insulin levels after consumption, making it a viable and healthy alternative to sucrose. The physiological functions, industrial manufacturing, and current applications of isomalt were reviewed. The production processes (biocatalysis and hydrogenation technology) of isomalt were systematically introduced. The research progress on the key enzyme sucrose isomerase, involved in isomalt biosynthesis, including its structure, catalytic mechanism, and molecular modification were elaborated, providing valuable guidance for further research and industrial-scale production in this field.

Keywords: sweetener; functional sugar alcohol; isomalt; sucrose isomerase; chemical hydrogenation

(责任编辑:李 宁)