

天然甜味剂功能活性及应用研究进展

朱 迪¹ 宿玲恰^{2*}

(1. 元气森林(北京)食品科技集团有限公司, 北京 100125; 2. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 过量摄入糖类严重威胁人类健康, 可引发糖尿病、肥胖及龋齿等疾病, 因此减糖已成为全球公共卫生战略, 推动着低热量天然甜味剂的研究和开发。作者综述了 *D*-阿洛酮糖、*D*-塔格糖、赤藓糖醇、木糖醇、甜菊糖苷、罗汉果甜苷这 6 种天然甜味剂的特性、制备方法、代谢与功能活性, 并探讨了其未来发展方向。旨在指导食品开发者和消费者能够科学认知和使用天然甜味剂, 为后续天然甜味剂的研究和市场推广提供参考。

关键词: 天然甜味剂; *D*-阿洛酮糖; *D*-塔格糖; 赤藓糖醇; 木糖醇; 甜菊糖苷; 罗汉果甜苷

Advancements in the Functional Activities and Application of Natural Sweeteners

ZHU Di¹ SU Lingqia^{2*}

(1. Chi Forest (Beijing) Food Technology Group Co., Ltd., Beijing 100125, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Excessive consumption of sugars poses numerous health risks to humans and can induce diabetes, obesity, and dental caries. Sugar reduction has become a global initiative, prompting the research and development of low-calorie natural sweeteners. The advancements in the attributes, production techniques, metabolism, and functions of six representative natural sweeteners, namely *D*-allulose, *D*-tagatose, erythritol, xylitol, steviol glycosides, and mogroside, and their practical applications were reviewed. The potential development directions of the sweetener industry were discussed. The aims are to ensure accurate awareness and proper utilization of natural sweeteners by both food developers and consumers and to provide guiding significance for future research and market expansion of natural sweeteners.

Keywords: natural sweetener; *D*-allulose; *D*-tagatose; erythritol; xylitol; steviol glycosides; mogroside

近几十年来, 高卡路里食物(特别是高糖食品)已引发严重的健康隐患, 如龋齿、肥胖、糖尿病和心脑血管疾病等, 已成为全球性难题^[1]。2021 年《世界糖尿病地图》显示, 全球成年糖尿病患者约 5.37 亿人(平均每 10 个人中有 1 例)^[2]。2023 年 3 月世界肥胖联盟发布的《世界肥胖地图》预测, 到 2035 年全球超重肥胖人数将突破 40 亿, 占全球人数的 51%^[3]。世界卫生组织《全球口腔卫生状况报告》进一步指出, 过量摄入糖类直接导致约 35 亿人患有口腔疾病, 包括蛀牙、严重的牙龈疾病、牙齿

脱落及口腔癌等^[4]。

全球减糖行动已广泛开展, 至 2023 年已有超过 103 个国家和地区对含糖饮料征收“糖税”, 覆盖全球人口的 51%^[5]。也有很多国家制订了食品包装正面标识(FOP)标准。我国卫生健康委员会发布的《健康中国行动(2019—2030)》明确鼓励全社会参与减盐、减油、减糖, 倡导食品生产经营者用食品安全标准允许使用的天然甜味物质和甜味剂代替蔗糖, 科学降低加工食品中的蔗糖含量。

无热量或低热量的甜味剂为开发健康和美味

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101884)。

通信作者: 宿玲恰(1987—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品生物技术研究。E-mail: sulingqia@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2023-08-22 修回日期: 2023-09-22

兼顾的食品提供了解决方案。市场上的商业甜味剂由天然和人造甜味物质组成。然而,并不是所有的甜味剂均适合所有人群,尤其是孕妇和哺乳期妇女等特殊人群^[6]。糖精^[7]、阿斯巴甜^[8]等甜味剂因葡萄糖耐受不良和致癌等健康风险被屡次报道^[6]。

随着人们对绿色、低热量且口感优良甜味剂的需求日益增长,天然甜味剂显示出良好的市场前景。天然甜味剂通常是从自然界中直接提取或经适当改

造得到的一类具有甜味的化学物质,主要是植物或微生物的次生代谢产物,具有口感好、溶解性好、稳定性强,成本适中等特点。天然甜味剂主要包括 *D*-阿洛酮糖、*D*-塔格糖等稀有糖,赤藓糖醇、木糖醇等糖醇类甜味剂,以及甜菊糖苷、罗汉果甜苷等非糖高倍甜味剂,见图 1^[9-11]。作者综述了上述几种代表性天然甜味剂的特性、制备方法、代谢与功能活性研究进展,为其开发应用与科学消费提供参考。

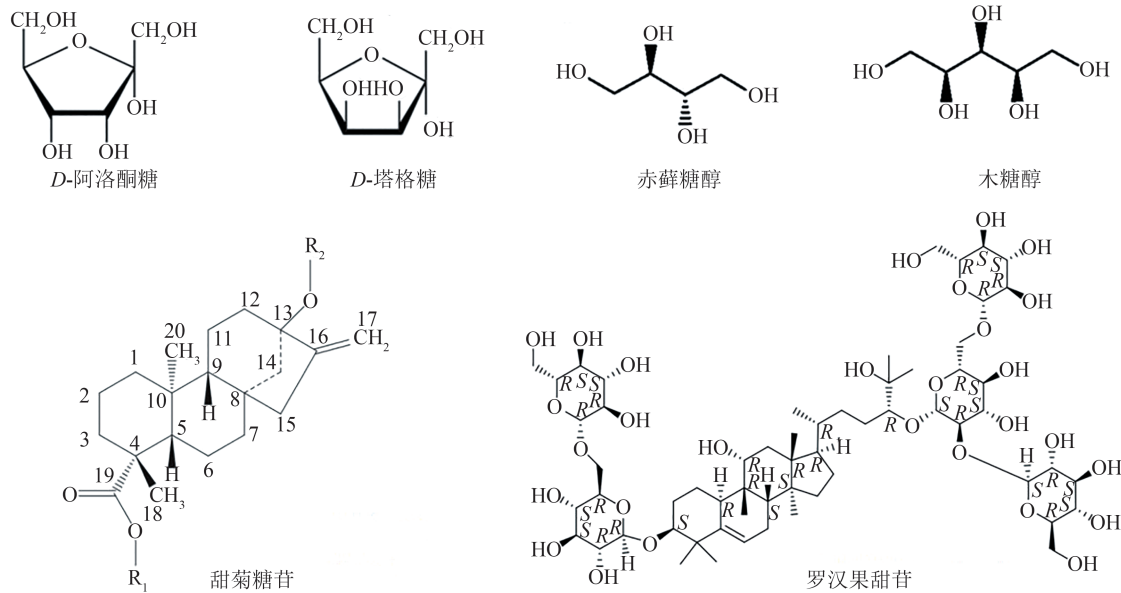


图 1 天然甜味剂的结构与分子式

Fig. 1 Structures and molecular formulas of natural sweeteners

1 天然甜味剂的种类和特性

1.1 稀有糖

天然存在的稀有糖逐渐受到关注,已成为一种可替代商业甜味剂的选择。这些单糖及其衍生物在自然界中含量极少,难以通过化学方法合成。国际稀有糖协会(ISRS)将稀有糖定义为“自然界罕见的单糖及其衍生物”,目前已发现 50 余种,如 *D*-阿洛酮糖和 *D*-塔格糖^[12]。这类甜味剂具有适

口性好、无不良杂味、基本不被人体代谢、能量低及升糖指数低等特点,见表 1^[9,13-14]。

D-阿洛酮糖作为 *D*-果糖的 C₃差向异构体,熔点为 96 °C,密度为 1.35 g/cm³,甜度达蔗糖的 70%,但能量几乎为零,是理想的蔗糖替代品。其天然来源有限,极少存在于植物或细菌中,主要存在于加工食品中,如经过长期加热的果汁^[15]。

天然己糖 *D*-塔格糖是果糖的差向异构体,具

表 1 天然甜味剂的甜度、能量及升糖指数

Table 1 Sweetness, energy, and glycemic index of natural sweeteners

类型	名称	天然甜味剂与蔗糖甜度的比值	能量/(kJ/g)	升糖指数
稀有糖	<i>D</i> -阿洛酮糖	0.7	0.8	0
	<i>D</i> -塔格糖	0.92	8.4	3
糖醇类	赤藓糖醇	0.7	0.8	0
	木糖醇	1	10.5	13
非糖高倍甜味剂	甜菊糖苷	200~400	0	0
	罗汉果甜苷	100~250	0	0

有良好的耐酸碱与耐热特性,且体积较小^[16]。

1.2 糖醇

糖醇天然存在于水果、特定蔬菜及蘑菇中,被认为是安全的天然食品添加剂^[17]。糖醇具有甜味纯正、热量低、受热不褐变等特点^[18],如赤藓糖醇、木糖醇、山梨糖醇、甘露醇、麦芽糖醇和乳糖醇等。这些糖醇的甜度为蔗糖的 25%~100%,尚未规定每日允许摄入量(ADI)。尽管可能引起通便或胃肠不适(如恶心、腹胀等),但未表现出高强度人工甜味剂的健康风险。

赤藓糖醇广泛存在于蔬菜、水果(瓜类、桃子)、蘑菇和发酵食品(如葡萄酒、啤酒、清酒和酱油等)中^[17]。它是一种分子结构对称、不易吸湿的结晶物质,即使温度高于 180 °C 也能保持稳定,且不会在酸性或碱性环境中分解,是耐受性最佳的多元醇。当溶解时,赤藓糖醇由于高负热特性而表现出强烈的冷却效果,即清凉感^[19]。作为法规唯一认定的无热量多元醇,其升糖指数为 0,对血糖无影响,热量极低。

木糖醇是一种五碳多元醇,天然存在于水果、蔬菜、燕麦和蘑菇中,人体也能少量产生^[17]。其甜度与蔗糖相同,是所有糖醇中甜度最高的一种,不参与美拉德反应,没有令人不悦的味道,且热量和升糖指数均低于蔗糖^[20]。

1.3 非糖高倍甜味剂

植物来源的非糖高倍甜味剂具有甜度高、不影响血糖变化以及体内代谢不生成能量等特点,是糖尿病和减肥人群的理想甜味剂。

数百年来,巴西和巴拉圭一直将甜叶菊(*Steria rebaudiana*)作为传统的食品和药物食用^[21]。甜菊糖苷是从甜叶菊中提取纯化的一种天然、高倍、非营养型甜味剂。它属于植物次生代谢物的二萜类化合物,其化学结构以甜菊醇的糖苷酮核心为基础,附着不同数量和类型的糖分子,其中 R₁ 和 R₂ 糖苷长度以及总 β -糖基残基的数量都与甜度相关^[22]。主要的糖苷包括甜菊苷和瑞鲍迪苷 A(Reb A)、其他已知的糖苷还包括瑞鲍迪苷 B、瑞鲍迪苷 C、瑞鲍迪苷 D、瑞鲍迪苷 F、杜克苷 A、甜茶苷及甜菊双糖苷^[23]。

另一种被列为“一般认为安全(GRAS)”的天然甜味剂是罗汉果甜苷^[20],是从罗汉果中提取的,罗汉果是一种原产于中国南部和泰国北部的多年

生草本藤类葫芦科植物^[24]。罗汉果在我国广西已有 200 多年的种植历史^[25],主要用于治疗感冒、咽痛及轻微肠胃炎等疾病,是最早获批的药食同源物质之一^[26]。罗汉果甜苷的主要生物活性物质是三萜皂苷,其中最常见的是罗汉果苷 V。

2 天然甜味剂的制备方法

2.1 生物酶法

稀有糖一般通过生物酶法进行工业生产。该方法具有提取率高、成本低、污染物少等优点。*D*-阿洛酮糖常用的大规模工业制备方法包括:基于 Izumoring 策略,利用 *D*-果糖进行生物合成;以菊苣或菊粉等为原料,基于 DHAP 依赖型醛缩酶进行生物合成^[27]。从乳糖制备半乳糖,再通过半乳糖异构化即可获得 *D*-塔格糖。为了提高产率,可以添加氢氧化物络合剂^[16],以促进异构化平衡向生成 *D*-塔格糖的方向偏移。

2.2 微生物发酵法

微生物发酵法是通过特定菌种在适宜条件下进行底物转化来生产甜味剂的方法。该方法整体条件更温和、能耗更低、对环境更友好。例如,赤藓糖醇的工业生产通常以葡萄糖、蔗糖或麦秆为原料,通过酵母、细菌或丝状真菌进行发酵^[28]。木糖醇也可以通过代谢工程酵母(如酿酒酵母或念珠菌)进行大规模生产^[29]。

2.3 植物提取法

罗汉果提取物是通过水提法制备,经过滤和选择性浓缩富集甜味成分^[30]。这种方法是在传统植物提取方法的基础上不断优化和改进而来的。甜菊糖苷的提取方法多种多样,包括热水提取法、超声辅助提取法、大孔树脂吸附法、快速固液动态萃取法、双水相体系提取法及超临界萃取法等^[31]。

2.4 其他方法

天然甜味剂的制备方法还包括化学合成法。例如,木糖醇一般是从木材(白桦树或其他硬木)中分离木聚糖,然后水解成木糖,再通过化学氢化将 *D*-木糖转化为糖醇^[29]。然而,化学合成法存在生产条件要求高、污染大、产品纯度低等问题。

此外,早期研究还聚焦甜叶菊中 SvGls 的生物合成以及刺激 SvGls 产生的农业育种方法。当前则通过多倍体诱导、常规繁殖和体外培养技术等手段来提高甜菊糖苷的产量^[32]。

3 天然甜味剂的代谢与功能活性

3.1 天然甜味剂的代谢

有些天然甜味剂在体内参与新陈代谢,有些则不参与新陈代谢。不参与新陈代谢的天然甜味剂大部分通过尿液直接排出(约占70%~90%),如D-阿洛酮糖和赤藓糖醇^[27,33];其余部分在结肠进行发酵,产生短链脂肪酸,并释放少量能量。参与新陈代谢的天然甜味剂的体内代谢过程各不相同。D-塔格糖有20%可完全参与代谢,其代谢途径与果糖相似,在肝脏中完成^[34]。口服甜菊糖苷则是在结肠中经肠道拟杆菌发酵为甜菊醇后,通过门静脉吸收,再由肝脏代谢为甜菊醇葡萄糖苷酸,最终由尿液排出^[35]。罗汉果甜苷在体内(心、肝、脾、肺等器官)通过羟化、脱氢、甲基化或异构化反应产生多种代谢产物,主要是罗汉果代谢物、罗汉果苷IIA和罗汉果苷IEE,最终通过尿液或粪便排泄^[36]。木糖醇可以直接在肝脏中代谢,也可以通过肠道菌群的发酵间接分解^[17],且木糖醇代谢并不依赖胰岛素^[20]。

3.2 减肥功能

临床研究显示,剂量为8 g/d的D-阿洛酮糖^[37]、5 g/d的D-塔格糖^[38]、75 g/d的赤藓糖醇或50 g/d的木糖醇^[39]等天然甜味剂在一定程度上具有减肥功能。

3.2.1 抑制食欲、增加饱腹感

D-阿洛酮糖通过抑制NPY神经元并激活ARC中的POMC神经元,从而抑制食欲、增加饱腹感并减少食物摄入量^[40]。木糖醇或赤藓糖醇能够显著促进CCK和GLP-1的释放,这2种激素从肠道释放出来响应食物摄入、增加饱腹感并减缓胃排空速率^[39]。D-塔格糖^[41]、甜菊糖苷^[42]和罗汉果甜苷^[43]同样可减少食物摄入量并降低体质量。

3.2.2 加速代谢

D-阿洛酮糖可下调肝脏脂肪酸合酶活性并增强 β 氧化能力,提升能量消耗,减少脂肪堆积^[44]。长期摄入木糖醇可诱导脂肪 β 氧化基因的表达,该基因可促进肝脏和脂肪组织中的脂肪分解^[45]。

3.2.3 抑制脂肪吸收

D-阿洛酮糖可通过调节瘦素与抵抗素的水平^[44]来减少脂肪生成^[46],从而改善糖脂代谢。木糖醇可能通过调节ChREBP基因、成脂酶基因和甾醇

调节元件结合蛋白1c的表达,预防饮食诱导的肥胖和代谢异常^[45]。罗汉果甜苷通过抑制胰腺脂肪酶活性来抑制肠道对脂肪的吸收,从而减轻体质量、减少腹部和睾丸的脂肪堆积^[47]。

3.2.4 抑制营养物质转化

D-塔格糖通过抑制碳水化合物消化酶(如蔗糖酶和麦芽糖酶)的活性阻碍脂质形成,起到“糖阻滞剂”的作用,以实现医学推荐的减肥效果^[16,48]。

3.2.5 改善肠道菌群

D-阿洛酮糖通过控制肠道微生物来改善体质量和脂肪性肝病^[49]。

3.3 降血糖功能

D-阿洛酮糖以剂量依赖性方式降低受试者血浆葡萄糖与胰岛素水平,以及餐后血糖和胰岛素波动^[50];甜菊糖苷可降低受试者餐后血糖水平^[51];D-塔格糖降低糖化血红蛋白的最小剂量为5.0 g/d^[38]。

3.3.1 抑制肝糖输出

D-阿洛酮糖通过降低肝磷酸烯醇丙酮酸羧激酶和葡萄糖-6-磷酸酶活性,以及抑制葡萄糖转运蛋白4、胰岛素受体底物1、磷脂酰肌醇-4,5-二磷酸3-激酶催化亚基 α 和AKT丝氨酸/苏氨酸激酶2的表达,从而降低胰岛素敏感性,并降低血清胰岛素和瘦素水平^[52]。同样,D-塔格糖可能通过抑制糖原磷酸化酶活性、增加肝脏糖原合成并抑制糖原分解来降低餐后血糖和胰岛素水平^[38,48]。赤藓糖醇通过竞争性抑制 α -葡萄糖苷酶活性发挥抗餐后高血糖作用^[53]。甜菊糖苷或罗汉果甜苷可抑制麦芽糖酶的活性,大鼠摄入后表现出显著的抗高血糖作用^[54]。

3.3.2 抑制碳水化合物的吸收

D-阿洛酮糖可有效抑制肠道蔗糖酶、麦芽糖酶和 α -葡萄糖苷酶的活性^[55],延迟糖类物质分解为单糖并减少肠道的吸收,从而干预碳水化合物摄入后的血糖水平。D-塔格糖还可以通过抑制肠道双糖酶和葡萄糖转运来抑制葡萄糖的吸收^[38]。

3.3.3 促进胰岛素分泌

在2型糖尿病大鼠的饮食中添加木糖醇后,其血清胰岛素浓度和糖耐量均有所提高^[56]。糖尿病大鼠摄入甜菊糖8周后,其随机血糖、空腹血糖和糖化血红蛋白水平显著降低,胰岛素水平显著改善^[42]。罗汉果甜苷通过促进胰岛素释放和胰腺损

伤愈合实现降血糖作用^[57]。

3.3.4 调节肠道菌群

D-阿洛酮糖通过调节微生物菌落改善小鼠因高脂饮食引起的肥胖和糖尿病代谢紊乱^[58]。

3.3.5 缓解氧化应激

赤藓糖醇可降低 STZ 诱导的糖尿病大鼠氧化应激相关指标,如降低血清中 5-羟甲基糠醛水平,降低血清、肝脏和肾脏线粒体的硫代巴比妥酸反应物水平等,从而抑制脂质过氧化并改善葡萄糖代谢^[59]。类似地,罗汉果甜苷也有清除自由基和防止氧化应激的功能^[57]。

3.4 保护牙齿健康

美国儿科牙科学会支持将木糖醇作为龋齿抑制剂使用,并强调应对木糖醇产品进行适当标识,以便父母和专业人士能够做出恰当选择^[60]。在口腔健康管理方面,赤藓糖醇表现出比木糖醇和山梨糖醇更好的效果。赤藓糖醇能有效减少牙菌斑的数量,从而降低龋齿发生率^[61]。在一项针对 3~7 岁儿童的长期研究中发现,食用含有赤藓糖醇的糖果 8 年后,牙菌斑明显减少,同时乙酸和丙酸水平也显著降低^[62]。

木糖醇可以抑制变形链球菌和索布里斯链球菌的生长与代谢,这 2 种细菌分别与龋齿和牙菌斑的产生有关^[63],对降低牙菌斑形成有积极作用^[64]。赤藓糖醇除抑制相关细菌的生长和活性外,还降低了口腔中常见链球菌在牙齿表面的黏附^[61]。赤藓糖醇与木糖醇联合使用能更有效地抑制变形链球菌的生长。有研究表明,从甜叶菊中提取的物质对多种微生物(包括真菌、革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌等 10 多种菌)表现出显著抗菌活性^[65]。甜菊糖溶液的不可发酵性质能阻碍细菌的存活^[66],还可以显著抑制牙齿表面变形链球菌生物膜的形成^[67],最终显著减少牙菌斑。

4 天然甜味剂的应用

4.1 *D*-阿洛酮糖的应用

D-阿洛酮糖已被美国、澳大利亚、新西兰、日本、韩国等多个国家批准使用,但我国尚未批准。美国 FDA 在 2014 年对 *D*-阿洛酮糖进行了安全认证,并于 2015 年被列为 GRAS 物质。2019 年, FDA 在有关营养标签指南草案中明确规定,*D*-阿洛酮糖不计入添加糖的统计范围内。由于 *D*-阿洛

酮糖具有高溶解度和高抗氧化活性,是食品加工中广泛应用的添加剂^[68]。此外,它还能改善食品的胶凝性能和膨胀度,提升食品风味,并抑制食品加工过程中由美拉德反应引起的氧化^[69]。*D*-阿洛酮糖一般用于无糖饮料、糖果、烘焙食品和乳制品生产中。在开发针对代谢性疾病人群的功能食品、保健品和药品方面具有很大的潜力。

4.2 *D*-塔格糖的应用

2001 年,美国 FDA 将 *D*-塔格糖列为 GRAS 物质,批准其作为营养甜味剂或低热量甜味剂使用。2004 年,联合国食品及农业组织/世界卫生组织联合专家委员会(JECFA)将其 ADI 设定为“未指定”。2005 年,*D*-塔格糖获得欧盟批准,成为“新食品配料”,且没有任何使用限制。中国、澳大利亚、新西兰、南非和韩国等国家也已批准使用 *D*-塔格糖^[70],主要应用于糖尿病或肥胖患者食用的饮料、酸奶等食品中,同时也应用在医药、口腔护理产品等领域。

4.3 赤藓糖醇的应用

虽然赤藓糖醇在 1852 年就被分离出来,但直至 1990 年,赤藓糖醇才作为一种新的天然甜味剂出现在日本市场。迄今为止,全球 60 多个国家已批准赤藓糖醇作为食品添加剂使用,包括美国、日本、加拿大、墨西哥、巴西、阿根廷、土耳其、俄罗斯、中国、印度、澳大利亚、新西兰等^[28]。经 JECFA 综合评估,将其 ADI 定为“未指定”。赤藓糖醇已广泛应用于各类食品中,尤其是无糖食品,如饮料、酸奶、冰淇淋、巧克力、糖果和烘焙食品等。

4.4 木糖醇的应用

木糖醇于 1891 年被发现,自 20 世纪 60 年代以来一直被用作食品添加剂和甜味剂。FDA 已经批准木糖醇可作为食品添加剂,在欧洲,木糖醇甚至可用于儿童食品^[71]。它主要用于赋予“无糖”糖果、饼干甜味,通常应用于糖果、巧克力、奶制品、冷冻甜点和烘焙食品等,并且在药品和保健品中也有应用。

4.5 甜菊糖苷的应用

甜菊糖苷因其开发潜力和保健功能在国际上被誉为“世界第三糖源”,在全球范围内的食品工业和医药化工中得到广泛应用。1970 年初,甜菊糖苷在日本首次被用作甜味剂进行商业化生产,现已在韩国、中国、美国等国家应用。高纯度的甜菊糖

苷和来自甜菊叶的高强度甜味剂 RebA 被列为 GRAS 物质^[20]。目前, JECFA 暂定其 ADI 为 0~2 mg/(kg·d)(以甜菊醇计)^[72]。2018 年仅欧洲市场上食品和饮料领域涉及甜菊糖苷的产品就增长了 26%。在添加甜菊糖苷的饮料和食品领域中, 对更天然、更健康的甜叶菊产品的需求激增。许多知名公司都推出了基于甜叶菊的产品, 包括达能集团、百事公司、可口可乐公司、雀巢集团、利口乐公司和联合利华^[73]。

4.6 罗汉果甜苷的应用

澳大利亚、新西兰、中国和日本等国均已批准罗汉果甜苷为食品添加剂^[57]。罗汉果甜苷具有强烈的甜味, 在天然甜味剂中仅次于甜菊糖, 是第二重要的天然甜味剂。预计到 2026 年, 全球罗汉果市场将保持稳定, 以每年 4.37% 的复合年增长率增长^[74]。由于其热稳定性强, 可用于烘焙等领域。

5 展望

随着人们对高质量健康生活的追求以及消费者对天然产品的偏好, 天然甜味剂作为可替代传统糖的理想选择, 以其低热量和自然来源的特点, 既满足了人们对甜味的渴望, 又避免了高糖饮食给身体和心理带来的负担。随着研究的不断深入, 天然低热量甜味剂将实现回归自然、健康与美味共存。基于此, 天然甜味剂的研究与产业发展可从以下几个方面考虑:

1) 天然甜味剂的优化与迭代: 以植物作为天然来源, 开发具有良好的生物可持续性和安全性的天然低热量甜味剂, 以满足消费者对多样化食品的需求。为了确保甜味剂的使用不受杂质的影响, 并在食品中稳定、均匀地分布, 需要通过高效的提取和精炼工艺, 使高质量天然甜味剂更好地保留原始甜味特性, 为消费者带来更加纯正、更接近传统糖的味觉体验。应用先进的育种技术, 培育能产生优质天然甜味剂的植物。通过新技术的应用, 提高原料利用率, 降低工业生产成本, 发掘成本低、产量大、稳定性强的天然甜味剂。

2) 天然甜味剂的功能性验证: 除了提供甜味, 未来的天然甜味剂将朝着功能应用的方向发展。现有的一些体内、外研究和临床研究均表明天然甜味剂(如 D-阿洛酮糖、甜菊糖苷、赤藓糖醇等)可维持身体健康, 具有减肥、抗糖尿病和改善龋齿等

多种潜力, 为消费者提供更加全面和有价值的食品选择。

3) 天然甜味剂的复配改良: 天然甜味剂各有特点, 不同甜度的甜味剂复配, 既能赋予食品良好的口感, 又能有效地发挥功能性甜味剂的保健功能。因此, 一款天然无糖产品添加 3 种以上的甜味剂是常见现象。目前, 许多香精公司与食品企业共同合作, 参与到天然甜味剂风味改良技术开发中, 通过整体风味的调整, 针对性地进行口味的遮蔽和甜感释放, 提高消费者对减糖产品的整体喜好度或接受度。

天然甜味剂作为健康食品原料的代表, 未来发展前景广阔。天然甜味剂的优化与迭代、功能性验证以及复配改良, 将推动其在食品工业中得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 丁刚强, 马爱国, 孙长瀛. 中国居民膳食指南科学研究报告[R]. 北京: 中国营养学会, 2021.
- [2] International Diabeters Federation. IDF Atlas 10th edition [EB/OL]. [2023-08-22]. <https://diabetesatlas.org/data/en/>.
- [3] World Obesity Federation. World obesity atlas 2023[R]. London: World Obesity Federation, 2023.
- [4] World Health Organization. Global oral health status report: towards universal health coverage for oral health by 2030 [R]. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [5] HATTERSLEY L, MANDEVILLE K L. Global coverage and design of sugar-sweetened beverage taxes[J]. JAMA Network Open, 2023, 6(3): e231412.
- [6] AL-QUDSI F M, AL-HASAN M M. In utero exposure to commercial artificial sweeteners affects mice development and mammary gland structure[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(5): 5054-5064.
- [7] AZEEZ O H, ALKASS S Y, PERSIKE D S. Long-term saccharin consumption and increased risk of obesity, diabetes, hepatic dysfunction, and renal impairment in rats [J]. Medicina, 2019, 55(10): 681.
- [8] WHO. Aspartame hazard and risk assessment results released [N/OL]. World Food Regulation Review, [2023-07-14]. <https://www.iarc.who.int/featured-news/aspartame-hazard-and-risk-assessment-results-released>.
- [9] CHATTOPADHYAY S, RAYCHAUDHURI U, CHAKRABORTY R. Artificial sweeteners: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(4): 611-621.
- [10] MIJAILOVIC N, NESLER A, PERAZZOLLI M, et al. Rare sugars: recent advances and their potential role in

- sustainable crop protection[J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 1720.
- [11] KISHIDA K, IIDA T, YAMADA T, et al. Intestinal absorption of *D*-fructose isomers, *D*-allulose, *D*-sorbitose and *D*-tagatose, via glucose transporter type 5 (GLUT5) but not sodium-dependent glucose cotransporter 1 (SGLT1) in rats[J]. *British Journal of Nutrition*, 2023, 130(11):1852-1858.
- [12] IZUMORI K. Bioproduction strategies for rare hexose sugars[J]. *The Science of Nature*, 2002, 89(3):120-124.
- [13] LIVESEY G. Health potential of polyols as sugar replacers, with emphasis on low glycaemic properties[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2003, 16(2):163-191.
- [14] GUERRERO-WYSS M, DURÁN AGÜERO S, ANGARITA DÁVILA L. *D*-tagatose is a promising sweetener to control glycaemia: a new functional food[J]. *BioMed Research International*, 2018(1):8718053.
- [15] 李勉, 唐文娟, 蔡雪, 等. *D*-阿洛酮糖酶法生产的研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2021, 40(7):1-9.
- LI M, TANG W J, CAI X, et al. Recent advances in enzymatic production of *D*-allulose[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2021, 40(7):1-9. (in Chinese)
- [16] LU Y, LEVIN G V, DONNER T W. Tagatose, a new antidiabetic and obesity control drug[J]. *Diabetes, Obesity & Metabolism*, 2008, 10(2):109-134.
- [17] GREMBECKA M. Sugar alcohols: their role in the modern world of sweeteners: a review[J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 241:1-14.
- [18] 左齐乐, 张文瑶, 杨武龙, 等. 糖醇类甜味剂的甜味与副味影响因素研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(3):20-29.
- ZUO Q L, ZHANG W Y, YANG W L, et al. Study on factors of sweetness and side taste of sugar alcohol sweetener[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(3):20-29. (in Chinese)
- [19] PARK Y C, LEE D Y, LEE D H, et al. Proteomics and physiology of erythritol-producing strains[J]. *Journal of Chromatography B*, 2005, 815(1/2):251-260.
- [20] CHATTOPADHYAY S, RAYCHAUDHURI U, CHAKRABORTY R. Artificial sweeteners: a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(4): 611-621.
- [21] SEHAR I, KAUL A, BANI S, et al. Immune up regulatory response of a non-caloric natural sweetener, stevioside[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2008, 173(2):115-121.
- [22] SPAKMAN D. How to broaden the applicability of the high potency sweeteners steviol glycosides: from enzymatic glycosylation to recombinant production [D]. Groningen: University of Groningen, 2015.
- [23] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品添加剂 甜菊糖苷: GB 1886.355-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [24] SWINGLE W T. *Momordica grosvenori* sp. nov. the source of the Chinese Lo Han Kuo[J]. *Journal of the Arnold Arboretum*, 1941, 22(2):197-203.
- [25] Pandey A K, Chauhan O P. Monk fruit (*Siraitia grosvenorii*): health aspects and food applications [J]. *Pantnagar Journal of Research*, 2019, 17(3), 191-198.
- [26] 姜程曦, 程锦国, 罗婷. 药食同源植物的营养价值分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(11):282-284.
- JIANG C X, CHENG J G, LUO T. Nutritional value analysis of medicinal and edible plant [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(11): 282-284. (in Chinese)
- [27] CHEN Z, GAO X D, LI Z J. Recent advances regarding the physiological functions and biosynthesis of *D*-allulose [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13:881037.
- [28] REGNAT K, MACH R L, MACH-AIGNER A R. Erythritol as sweetener: wherefrom and whereto? [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102: 587-595.
- [29] AHUJA V, MACHO M, EWE D, et al. Biological and pharmacological potential of xylitol: a molecular insight of unique metabolism[J]. *Foods*, 2020, 9(11):1592.
- [30] EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), YOUNES M, AQUILINA G, et al. Safety of use of monk fruit extract as a food additive in different food categories [J]. *EFSA Journal*, 2019, 17(12):e05921.
- [31] 韩仁娇, 蓝航莲, 王彩云, 等. 天然甜味剂: 甜菊糖苷及其在食品中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21):312-319.
- HAN R J, LAN H L, WANG C Y, et al. Advances on natural sweetener stevioside and its application in food[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(21): 312-319. (in Chinese)
- [32] RAI A, HAN S S. Critical review on key approaches to enhance synthesis and production of steviol glycosides: a blueprint for zero-calorie sweetener[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(17):8640.
- [33] BORNET F R J, BLAYO A, DAUCHY F, et al. Plasma and urine kinetics of erythritol after oral ingestion by healthy humans [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1996, 24(2):280-285.
- [34] NORMÉN L, LAERKE H N, JENSEN B B, et al. Small-bowel absorption of *D*-tagatose and related effects on carbohydrate digestibility: an ileostomy study [J]. *The*

- American Journal of Clinical Nutrition, 2001, 73 (1): 105-110.
- [35] SRIMAROENG C, JUTABHA P, PRITCHARD J B, et al. Interactions of stevioside and steviol with renal organic anion transporters in S2 cells and mouse renal cortical slices[J]. Pharmaceutical Research, 2005, 22: 858-866.
- [36] LUO Z L, QIU F, ZHANG K L, et al. *In vitro* AMPK activating effect and *in vivo* pharmacokinetics of mogroside V, a cucurbitane-type triterpenoid from *Siraitia grosvenorii* fruits[J]. RSC Advances, 2016, 6(9): 7034-7041.
- [37] HAN Y, KWON E Y, YU M K, et al. A preliminary study for evaluating the dose-dependent effect of *D*-allulose for fat mass reduction in adult humans: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. Nutrients, 2018, 10(2): 160.
- [38] ENSOR M, WILLIAMS J, SMITH R, et al. Effects of three low-doses of *D*-tagatose on glycemic control over six months in subjects with mild type 2 diabetes mellitus under control with diet and exercise [J]. Journal of Endocrinology, Diabetes & Obesity, 2014, 2(4): 1057.
- [39] WÖLNERHANSEN B K, CAJACOB L, KELLER N, et al. Gut hormone secretion, gastric emptying, and glycemic responses to erythritol and xylitol in lean and obese subjects [J]. American Journal of Physiology, Endocrinology and Metabolism, 2016, 310(11): 1053-1061.
- [40] RAKHAT Y, KANEKO K, WANG L, et al. *D*-allulose inhibits ghrelin-responsive, glucose-sensitive and neuropeptide Y neurons in the arcuate nucleus and central injection suppresses appetite-associated food intake in mice[J]. Nutrients, 2022, 14(15): 3117.
- [41] BUEMANN B, TOUBRO S, ASTRUP A. Human gastrointestinal tolerance to *D*-tagatose [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1999, 29(2): 71-77.
- [42] AHMAD U, AHMAD R S. Anti diabetic property of aqueous extract of *Stevia rebaudiana* Bertoni leaves in streptozotocin-induced diabetes in albino rats [J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2018, 18(1): 179.
- [43] MARONE P A, BORZELLECA J F, MERKEL D, et al. Twenty eight-day dietary toxicity study of Luo Han fruit concentrate in Hsd: SD® rats [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(3): 910-919.
- [44] HAN Y, HAN H J, KIM A H, et al. *D*-Allulose supplementation normalized the body weight and fat-pad mass in diet-induced obese mice *via* the regulation of lipid metabolism under isocaloric fed condition [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2016, 60(7): 1695-1706.
- [45] KIKUKU A, ARAI H, TAKASHI U, et al. Effects of xylitol on metabolic parameters and visceral fat accumulation [J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2011, 49(1): 1-7.
- [46] 黄维来, 江波, 张涛. *D*-阿洛酮糖对 Wistar 大鼠脂质代谢作用的研究 [J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(4): 344-349.
- HUANG W L, JIANG B, ZHANG T. *D*-psicose, favorably alters lipid metabolism in wistar rats [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(4): 344-349. (in Chinese)
- [47] SUN B S, CHEN Y P, WAG Y B, et al. Anti-obesity effects of mogrosides extracted from the fruits of *Siraitia grosvenorii* (Cucurbitaceae) [J]. African Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2012, 6(20): 1492-1501.
- [48] ERCAN-FANG N, GANNON M C, RATH V L, et al. Integrated effects of multiple modulators on human liver glycogen phosphorylase *a* [J]. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism, 2002, 283(1): 29-37.
- [49] HAN Y, PARK H, CHOI B R, et al. Alteration of microbiome profile by *D*-allulose in amelioration of high-fat-diet-induced obesity in mice [J]. Nutrients, 2020, 12(2): 352.
- [50] FRANCHI F, YARANOV D M, ROLLINI F, et al. Effects of *D*-allulose on glucose tolerance and insulin response to a standard oral sucrose load: results of a prospective, randomized, crossover study [J]. BMJ Open Diabetes Research & Care, 2021, 9: e001939.
- [51] FARHAT G, BERSET V, MOORE L. Effects of *Stevia* extract on postprandial glucose response, satiety and energy intake: a three-arm crossover trial [J]. Nutrients, 2019, 11(12): 3036.
- [52] LEE D, HAN Y, KWON E Y, et al. *D*-allulose ameliorates metabolic dysfunction in C57BL/KsJ-db/db mice [J]. Molecules, 2020, 25(16): 3656.
- [53] WEN H X, TANG B W, STEWART A J, et al. Erythritol attenuates postprandial blood glucose by inhibiting α -glucosidase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(6): 1401-1407.
- [54] SUZUKI Y A, MURATA Y, INUI H, et al. Triterpene glycosides of *Siraitia grosvenori* inhibit rat intestinal maltase and suppress the rise in blood glucose level after a single oral administration of maltose in rats [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(8): 2941-2946.
- [55] CHUNG M Y, OH D K, LEE K W. Hypoglycemic health benefits of *D*-psicose [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60: 863-869.
- [56] ISLAM M S, INDRAJIT M. Effects of xylitol on blood

- glucose, glucose tolerance, serum insulin and lipid profile in a type 2 diabetes model of rats[J]. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 2012, 61(1):57-64.
- [57] SURI S, KATHURIA D, MISHRA A, et al. Phytochemical composition and pharmacological impact of natural non-calorie sweetener-monk fruit (*Siraitia grosvenorii*): a review [J]. *Nutrition & Food Science*, 2021, 51(6): 897-910.
- [58] HAN Y, KWON E Y, CHOI M S. Anti-diabetic effects of allulose in diet-induced obese mice *via* regulation of mRNA expression and alteration of the microbiome composition[J]. *Nutrients*, 2020, 12(7):2113.
- [59] YOKOZAWA T, KIM H Y, CHO E J. Erythritol attenuates the diabetic oxidative stress through modulating glucose metabolism and lipid peroxidation in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(19):5485-5489.
- [60] American Academy on Pediatric Dentistry Council on Clinical Affairs. Policy on the use of xylitol in caries prevention[J]. *Pediatric Dentistry*, 2008, 30(Suppl. 7):36-37.
- [61] COCK P, MÄKINEN K, HONKALA E, et al. Erythritol is more effective than xylitol and sorbitol in managing oral health endpoints [J]. *International Journal of Dentistry*, 2016(1):9868421.
- [62] 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.
- [63] BAHADOR A, LESAN S, KASHI N. Effect of xylitol on cariogenic and beneficial oral streptococci: a randomized, double-blind crossover trial [J]. *Iranian Journal of Microbiology*, 2012, 4(2):75-81.
- [64] BENAHMED A G, GASMI A, ARSHAD M, et al. Health benefits of xylitol[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104:7225-7237.
- [65] GHOSH S, SUBUDHI E, NAYAK S. Antimicrobial assay of *Stevia rebaudiana* Bertoni leaf extracts against 10 pathogens [J]. *International Journal of Integrative Biology*, 2008, 2(1):27.
- [66] SAIRA S E, PUSHPANJALI K, MANORANJITHA B S. Efficacy of stevioside sweetener on pH of plaque among young adults[J]. *Dental Research Journal*, 2019, 16(2):104-109.
- [67] BRAMBILLA E, CAGETTI M G, IONESCU A, et al. An *in vitro* and *in vivo* comparison of the effect of *Stevia rebaudiana* extracts on different caries-related variables: a randomized controlled trial pilot study[J]. *Caries Research*, 2014, 48(1):19-23.
- [68] SUN Y X, HAYAKAWA S, OGAWA M, et al. Influence of a rare sugar, D-psicose, on the physicochemical and functional properties of an aerated food system containing egg albumen [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(12):4789-4796.
- [69] OSHIMA H, KIMURA I, KITAKUBO Y, et al. Factors affecting psicose formation in food products during cooking [J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20(2):423-430.
- [70] ROY S, CHIKKERUR J, ROY S C, et al. Tagatose as a potential nutraceutical: production, properties, biological roles, and applications [J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(11):2699-2709.
- [71] LY K A, MILGROM P, ROTHEN M. Xylitol, sweeteners, and dental caries [J]. *Pediatric Dentistry*, 2006, 28(2): 154-163.
- [72] EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), YOUNES M, AQUILINA G, et al. Safety evaluation of glucosylated steviol glycosides as a food additive in different food categories [J]. *EFSA Journal*, 2022, 20(2):e07066.
- [73] KHILAR S, SINGH A P, BIAGI M, et al. An insight into attributes of *Stevia rebaudiana* bertoni: recent advances in extraction techniques, phytochemistry, food applications and health benefits[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, 10:100458.
- [74] Data Bridge Market Research. Global monk fruit sugar market astonishing growth, top competitors like archer daniels midland company; monk fruit corp. ; layn corp [N/OL]. Germany: Open PR, [2020-02-07]. <https://www.openpr.com/news/1923221/global-monk-fruit-sugar-market-astonishing-growth-top>.

(责任编辑:刘冬梅)