Hans Journal of Food and Nutrition Science 食品与营养科学, 2026, 15(6), 689-700
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjfns
https://doi.org/10.12677/hjfns.2026.156071

茶多酚糖基化修饰提升稳定性与生物利用度的研究进展

尹小明[1,2,3*]，阮文浩[1,2]，罗　杰[1,2,3]，高艺航[1,2]，张　玺[1,2]，徐义明[1,2]

[1]福建省饮料用植物提取技术企业重点实验室，福建 漳州
[2]上海吉罗恩生物科技有限公司，上海
[3]上海交通大学药学院，上海

收稿日期：2026年10月1日；录用日期：2026年10月29日；发布日期：2026年11月11日

摘　要

表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)是绿茶中含量最高、研究最充分的儿茶素，具有抗氧化、抗炎、代谢调节和神经保护等活性。其在食品体系中的应用受水溶性有限、中性至弱碱条件下易氧化与差向异构、口服表观生物利用度低以及苦涩味等因素共同限制。在酚羟基上引入葡萄糖等糖基可提高分子极性并屏蔽部分易氧化位点，从而改善溶解性与热/pH稳定性，主要提升生物可及性。化学糖基化需借助保护基化学；在弱酸性水溶液、温和温度下进行的酶法转糖基反应条件更温和、区域选择性更高，因而更接近食品级制备。本文按位点、糖基数和糖苷键构型梳理环糊精葡萄糖基转移酶(CGTase)、葡聚糖蔗糖酶、蔗糖磷酸化酶(SP)及工程化糖苷酶/糖合成酶四条路线。

关键词

茶多酚，EGCG，酶法糖基化，蔗糖磷酸化酶，生物可及性，生物利用度，功能食品

Research Progress on Enzymatic Glycosylation of Tea Polyphenols for Improved Stability and Bioavailability

Xiaoming Yin[1,2,3*], Wenhao Ruan[1,2], Jie Luo[1,2,3], Yihang Gao[1,2], Xi Zhang[1,2], Yiming Xu[1,2]

[1]Fujian Key Laboratory of Plant Extraction Technology for Beverage, Zhangzhou Fujian
[2]Shanghai Jiluoen Biotechnology Co., Ltd., Shanghai
[3]School of Pharmacy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

Received: October 1, 2026; accepted: October 29, 2026; published: November 11, 2026

*通讯作者。

文章引用: 尹小明, 阮文浩, 罗杰, 高艺航, 张玺, 徐义明. 茶多酚糖基化修饰提升稳定性与生物利用度的研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(6): 689-700. DOI: 10.12677/hjfns.2026.156071

Abstract

Epigallocatechin-3-gallate (EGCG) is the most abundant and intensively studied catechin in green tea (Camellia sinensis), with documented antioxidant, anti-inflammatory, metabolic and neuroprotective activities. Practical use in foods is constrained by modest aqueous solubility, rapid autoxidation and epimerization under neutral-to-alkaline conditions, low apparent oral bioavailability and astringency. O-glycosylation of phenolic hydroxyls increases polarity and can shield oxidation-prone sites, which typically improves solubility and thermal/pH stability and thus mainly enhances bioaccessibility. Chemical glycosylation requires protecting-group chemistry; enzymatic transglycosylation in weakly acidic water at moderate temperature is milder and more regioselective, and is therefore closer to food-grade manufacture. This review compares four enzymatic routes—cyclodextrin glucanotransferase (CGTase), dextransucrase, sucrose phosphorylase (SP) and engineered glycoside hydrolases/glycosynthases—by substitution site, sugar number and anomeric configuration.

Keywords

Tea Polyphenols, EGCG, Enzymatic Glycosylation, Sucrose Phosphorylase, Bioaccessibility, Bioavailability, Functional Foods

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

茶叶(*Camellia sinensis*)是全球消费量最大的植物饮料之一。茶多酚是茶叶中含量最高的一类次生代谢产物，其中儿茶素约占茶多酚的 60%~80%，(−)-表没食子儿茶素-3-没食子酸酯(EGCG)又占绿茶儿茶素的一半以上，相关机制与应用研究最为集中[1] [2]。体外和动物实验表明，EGCG 可清除自由基、抑制 NF-κB 相关炎症通路，并对糖脂代谢、心血管和神经系统产生调节作用[1]-[3]。近年综述进一步覆盖抗肿瘤、肠道菌群和皮肤氧化应激等方向，但几乎都指出同一瓶颈：体外活性与人体可利用剂量之间存在明显落差[2] [4] [5]。

EGCG 在食品基质中难以稳定发挥功能，主要受以下几类性质叠加制约。其一，水溶性有限：Kim 等在 25℃测定的水溶液溶解度约为 5.1 mmol/L，高浓度饮料或浓缩液中不易稳定分散[6] [7]；化学法研究中因测定条件不同，亦有约 16 mmol/L 的报道[8]，提示溶解度数值对方法敏感，不宜跨文献直接比较绝对值。其二，B 环邻苯三酚与 D 环没食子酰基使分子在 pH ≥ 7 的水溶液中迅速氧化、聚合褐变，并差向异构成 GCG，活性随之下降[1] [9]。其三，口服后小肠吸收有限，肝肠中甲基化、硫酸化和葡萄糖醛酸化迅速，表观生物利用度常低于 10% [1] [9] [10]。其四，酚羟基与唾液蛋白的疏水及氢键结合带来苦涩，限制了添加量。

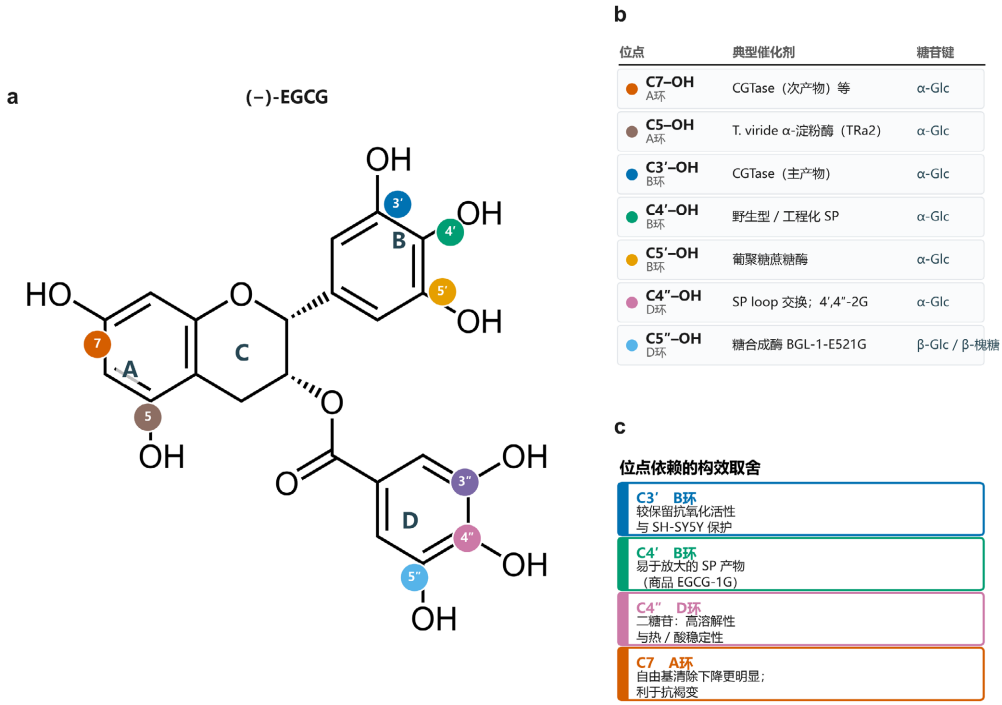
分生物可及性(bioaccessibility)与生物利用度(bioavailability)都用来评估经口摄入后，目标物质(营养素、活性成分、污染物)能够被人体利用和产生作用的潜力，都以总摄入量作为参照基准，用于风险评估或功效评价；两者不同的是，前者指活性成分从食品基质中释放、到达肠道吸收表面并可被吸收的比例，取决于溶解、分散与加工/贮存稳定性；后者指经吸收及肝肠首过代谢后进入全身循环的比例，取决于跨膜转运、外排与代谢转化。糖基化直接改善的是溶解性与化学稳定性，对应生物可及性；其对生物利用度

的影响尚待结构明确糖苷的药代数据。针对上述限制，文献中的策略大致分为三类：纳米/载体包埋、与蛋白或多糖形成非共价复合物，以及共价结构修饰(糖基化、酰化、甲基化等) [2] [4] [5] [9]-[11]。β-环糊精纳米粒可将大鼠口服相对生物利用度提高约 1.71 倍[11]，TPGS/泊洛沙姆 407 胶束使小鼠 AUC 提高约 2.27 倍[12]，但配方更复杂，澄清饮料的透光率和申报路径不一定更有利。糖基化是在酚羟基上引入糖基：极性上升、部分易氧化羟基被占据后，溶解性与化学稳定性常同步改善[6] [7] [13] [14]。化学法可得到 β-糖苷，但需保护和脱保护，不适合食品原料生产[8]。酶法以蔗糖、淀粉或麦芽糊精为供体，在水相、弱酸、中等温度下转糖基，区域选择性相对整齐[6] [7] [13]-[15]。作者先前讨论过植物多酚在食品中的应用及自组装递送[16] [17]。本文聚焦酶法 O-糖基化，按位点、糖基数和 α/β 构型归纳近十年尤其是 2025~2026 年对稳定性与吸收利用的证据，并明确哪些结论已被实验支持、哪些仍属外推。

2. 糖基化位点、糖苷类型与构效关系

2.1. EGCG 骨架与文献确证的成苷位置

EGCG 由 A 环(间苯三酚型)、C 环(黄烷-3-醇)、B 环(3′,4′,5′-三羟基苯)和 D 环(3-O-没食子酰基)构成，如图 1。可接糖的酚羟基理论上包括 C5、C7 (A 环)，C3′、C4′、C5′ (B 环)以及 C3″、C4″、C5″ (D 环)。酶法文献中经核磁共振(NMR)确认的 O-糖基化位置，主要是 B 环 4′、3′(及 5′)、A 环 7 和 5，以及没食子酰基上的 4″和 5″ [6] [7] [13]-[15] [18]-[23]。需要强调编号：没食子酰基与酯羰基相连的碳为 C1″，对位羟基为 C4″，两个间位羟基为 C3″和 C5″；不得将对位误标为 C5″。茶叶中天然存在大量黄酮醇 O-糖苷和 C-糖苷，已鉴定百余种[24]，说明植物本身即用接糖调节溶解与风味。酶法糖基化相当于把这一策略转移到反应器中，并要求产物结构可重复、可标识。



注：图 1 为 CAS 989-51-5 ((−)-EGCG，2R,3R)的结构式。成苷位点根据文献[6] [7] [13]-[15] [18]-[23]的 NMR 确证结果标注。

Figure 1. Molecular structure of (−)-EGCG (CAS 989-51-5) and its major enzymatic O-glycosylation sites
图 1. (−)-EGCG 的分子结构(CAS 989-51-5)及主要酶法 O-糖基化位点

CGTase、葡聚糖蔗糖酶和蔗糖磷酸化酶得到的产物多为 α-O-葡萄糖苷[6] [7] [13]-[15] [19] [20]；将 β-葡萄糖苷酶改造为糖合成酶，或将 β-木糖苷酶改造为硫代糖连接酶，可分别在 5″和 4″得到 β-葡萄糖苷、β-槐糖苷或 β-木糖苷[18]。α-苷与 β-苷在糖苷酶水解、跨膜吸收和口感上不可互换，综述和产品标识中应分开讨论。

2.2. 单糖苷、二糖苷与寡糖苷

按引入糖基数，常见产物为单葡萄糖苷(EGCG-1G)和二葡萄糖苷(EGCG-2G)，CGTase 和葡聚糖蔗糖酶还可形成寡糖苷。糖基数增加通常提高水溶性，但位阻增大可能减弱与蛋白靶点或自由基的接触[7] [13] [22]。Moon 等(2006)用葡聚糖蔗糖酶得到的 EGCG-7-O-α-葡萄糖苷、4′-O-α-葡萄糖苷和 7,4′-二葡萄糖苷，水溶性分别约为母体的 49、55 和 114 倍[22]；同组 J. Mol. Catal. B 工作中，4″-单糖苷及两种二糖苷分别提高约 69、126 和 122 倍[25]。Kim 等(2016)鉴定的 5 个新糖苷溶解度为 229.7~1878.5 mmol/L，最高约相当于 EGCG (5.1 mmol/L)的 368 倍[6]。Yang 等用重组 SP 制备 EGCG-4′,4″-O-α-D-二葡萄糖苷(EGCG-2G)，水溶性约为 EGCG 的 124 倍；在 50℃、pH 5 的磷酸盐缓冲液中连续 16 d，热/酸稳定性较 EGCG 提高 84.82%，较市售 EGCG-4′-O-α-葡萄糖苷(EGCG-1G)提高 35.36% [7]。二糖苷在溶解和贮存上确实强于相应单糖苷，但功能声称能否成立，仍取决于目标位点是否被过度屏蔽。

2.3. 糖基化位点与活性

Gonzalez-Alfonso 等将 CGTase 的两个单糖苷并列比较：α-葡萄糖基化后 pH 稳定性和热稳定性均优于 EGCG；但 A 环 C7 成苷导致的 ABTS 自由基清除能力下降，明显大于 B 环 C3′成苷。3′-糖苷减轻细胞内活性氧更明显：100 μmol/L 时，H_2O_2 损伤的 SH-SY5Y 神经元存活率约提高至 2.75 倍，游离 EGCG 约为 1.7 倍[13]。Kim 等用葡聚糖蔗糖酶获得 9 种 EGCG 葡萄糖苷，5′-OH 成苷的抗氧化强于 4′-OH 成苷，7-OH 成苷对酪氨酸酶抑制和抗褐变更有利[6]。Noguchi 等用 *Trichoderma viride* α-淀粉酶在 A 环 C5 引入 α-葡萄糖基，产物热稳定性、溶解性提高，涩味下降[23]。因此，并不是“接了糖就一律更好”。若目标是保留儿茶素本身的氧化还原活性，宜优先修饰对活性贡献相对较小、但又容易氧化的羟基；若目标是把水溶性和货架期做高，二糖苷或 D 环成苷更合适。

化学法得到的 β-4″-单糖苷和 β-4′,4″-二糖苷对乳腺癌细胞有一定抑制，溶解度分别约为母体的 15 倍和 31 倍，说明 β-构型同样具有活性，只是制备条件限制了食品用途[8]。工程化糖苷酶得到的 β-葡萄糖苷、β-槐糖苷和 β-木糖苷，溶解度提高 23~44 倍，抗氧化略降，但对 MDA-MB-231 的抑制和对冈田酸损伤神经元的保护可以优于 EGCG；其中 β-木糖苷的热稳定性甚至不如母体，说明糖的种类与位置同等重要[18]。

3. 酶法制备路线

目前可规模讨论的酶法路线主要有四条(表 1)。比较时应同时给出供体、主产物结构、转化率或滴度、反应时间和是否为混合物：总转化率高并不等于单一结构收率高。

3.1. 环糊精葡萄糖基转移酶(CGTase)转化途径

Gonzalez-Alfonso 等(2018)用 *Thermoanaerobacter* 来源 CGTase，以部分水解马铃薯淀粉为供体，在 50℃水相转化 EGCG。主产物为 EGCG-3′-O-α-D-吡喃葡萄糖苷，转化率约 58% (7.2 mg/mL)；次产物为 EGCG-7-O-α-D-吡喃葡萄糖苷，约 13% (1.6 mg/mL) [15]。随后的性质测定表明，3′-位成苷在提高热、pH 稳定性的同时，对神经细胞的保护优于 7-位成苷[13]。该路线供体廉价，主产物相对集中。反应时间延长时 EGCG 自身会氧化损失，原文献对溶氧和抗氧化剂着墨不多。工艺上可在 CGTase 后串联淀粉葡萄糖苷酶，将寡糖苷修剪为单糖苷，以提高 3′-单糖苷比例。

Table 1. Comparison of major enzymatic glycosylation routes for tea polyphenols/EGCG
表 1. 茶多酚/EGCG 酶法糖基化主要路线比较

酶/路线	糖基供体	代表性主产物	转化率或滴度	选择性要点
L. mesenteroides SP (野生)	蔗糖	4′-*α*-Glc；4′,4″-*α*-2G	约 30%与 40% (早期)	两种产物并存[14]
CGTase (*Thermoanaerobacter*)	部分水解淀粉、麦芽糊精	EGCG-3′-O-*α*-Glc (主)，7-O-*α*-Glc (次)	约 58%与 13%	主产物较集中，寡糖苷可再酶切[13] [15]
葡聚糖蔗糖酶 (*L. mesenteroides* B-1299CB4)	蔗糖	9 种单/二/三葡萄糖苷	EGCG 总转化约 91.43%	转化率高，异构体多[6] [22]
α-淀粉酶 TRa2 (*T. viride*)	糊精	EGCG-5-O-*α*-Glc；7-O-*α*-麦芽糖苷	未以 g/L 计	A 环 C5 少见位点[23]
SmSP (*S. mutans*)	蔗糖	EGCG-4′-O-*α*-Glc	10 g/L EGCG 转化 80.79%	loop 影响位点[19]
LmSP M3 (T219L/E393I/N335G)	蔗糖(补料)	EGCG-4′-O-*α*-Glc	31.11 g/L，收率 91.92%，纯度 87.27%	高选择性单糖苷[20]
SmSP_LoopB I235S/V297A	蔗糖	EGCG-4″-O-*α*-Glc	16.9 g/L，4 h 收率 83.3%	主产物由 4′切换至 4″[21]
重组 SP(响应面)	蔗糖	EGCG-4′,4″-O-*α*-2G	转化率 97.46%，纯度≥99%	明确二糖苷[7]
糖合成酶/硫代糖连接酶	*α*-GlcF 或 pNP-木糖	*β*-Glc/槐糖(5″)；*β*-Xyl (4″)	约 90%与 60%	*β*-构型；供体非食品常用[18]

3.2. 葡聚糖蔗糖酶与 *α*-淀粉酶转化途径

Moon 等(2006)首先用 *Leuconostoc mesenteroides* B-1299CB 葡聚糖蔗糖酶，以蔗糖为供体得到多种 EGCG *α*-葡萄糖苷，并定量了溶解性与抗褐变[22] [25]。Kim 等在同一酶系上用响应面优化，EGCG 总转化率达 91.43%，鉴定出 9 种葡萄糖苷(其中 5 种为新化合物)，水溶性为 229.7~1878.5 mmol/L [6]。GH70 家族葡聚糖蔗糖酶、分支蔗糖酶对酚羟基受体谱较宽，槲皮素、芦丁等亦可转化[26] [27]。若产品可接受混合物并作为抗氧化配料，该路线转化率高、操作简便；若要求单一结构的 EGCG-1G，后续 C18 或大孔树脂分离负担较重。

Noguchi 等从商品纤维素酶制剂中鉴定出 *T. viride α*-淀粉酶同源蛋白 TRa2，以糊精为供体，在 EGCG 的 A 环 C5 形成 *α*-葡萄糖苷、在 C7 形成 *α*-麦芽糖苷，C5-葡萄糖苷的热稳定性、溶解性提高且涩味下降[23]。该路线补充了 A 环 C5 这一在 CGTase/SP 主产物中不常见的位点。

3.3. 蔗糖磷酸化酶转化途径

蔗糖磷酸化酶(SP, EC 2.4.1.7, GH13)以蔗糖为供体，经糖基－酶中间体将葡萄糖转到 EGCG 上，副产物为果糖。Kitao 等早在 1995 年即用 *L. mesenteroides* SP 得到 EGCG-4′-O-*α*-葡萄糖苷和 EGCG-4′,4″-O-*α*-二葡萄糖苷，并证明接糖显著提高水溶液稳定性[14]；此后二十余年该反应几乎停留在“能转”的水平，直至近年酶工程重新把它做成可放大的催化剂。

Chen 等(2025)鉴定了 *Streptococcus mutans* 来源较耐热的 SP 变体(SmSP)，最适温度 45℃、最适 pH 6，主产物确证为 EGCG-4′-O-*α*-D-吡喃葡萄糖苷。在 8%甲醇、10 g/L EGCG、300 g/L 蔗糖、40 U/mL 粗酶、35℃、24 h 条件下，转化率 80.79%。两个活性位点 loop 对接到哪一个羟基影响很大[19]。

2026 年该方向出现三篇把选择性和滴度同时做上去的工作。Tong 等对 *L. mesenteroides* SP 进行环区改造、共识设计和 Rosetta 对接，三突变体 M3 (T219L/E393I/N335G)在 30℃转糖基活性提高 4.09 倍，45℃半衰期延长 1.69 倍；补料条件下 25 g/L EGCG 在 24 h 内转化为 31.11 g/L EGCG-4′-O-*α*-D-葡萄糖苷，摩尔收率 91.92%，纯度 87.27% [20]。Chen 等通过 loop 交换把 SmSP 主产物由 4′切换为 4″，再经隧道定向突变获得 SmSP_LoopB I235S/V297A，催化效率相对 LoopB 提高 140.5 倍；在 15 g/L EGCG、336 g/L 蔗糖、2 U/mL 酶条件下，4 h 内 EGCG-4″-O-*α*-葡萄糖苷收率 83.3% (16.9 g/L)，全细胞体系同样稳定[21]。Yang 等用重组 SP 经响应面优化，EGCG 转化率 97.46%，主产物为 EGCG-4′,4″-O-*α*-D-二葡萄糖苷，半制备液相纯度不低于 99%，并测定了溶解性、热稳定性和美白、抗炎活性[7]。至此，SP 路线已从“能转一点”进入“可按明确结构讨论滴度”的阶段。

3.4. 工程化糖苷酶、糖合成酶与发酵联合转化途径

Méndez-Líter 等把 *Talaromyces amestolkiae* 的 *β*-葡萄糖苷酶改造成糖合成酶(BGL-1-E521G)，把 *β*-木糖苷酶改造成硫代糖连接酶(BxTW1-E495A)，分别在 5″和 4″接上 *β*-葡萄糖/*β*-槐糖和 *β*-木糖，EGCG 转化率约 90%和 60% [18]。该路线的价值是拿到 *β*-构型，可与 *α*-葡萄糖苷分开使用；局限是需要活化糖供体(*α*-氟代葡萄糖、对硝基苯木糖苷等)，食品级放大成本高于蔗糖/淀粉路线。茯砖茶优势菌 *Eurotium cristatum* 在液态发酵中可对 EGCG 进行水解、糖基化、甲基化、硫酸化和聚合，酚类和黄酮含量上升、抗氧化增强[28]，但这是一锅代谢物，与定向酶法做出的单一糖苷不是同一类产品。

4. 稳定性提升的化学机制与加工适应性

游离 EGCG 在 pH ≥ 7 的缓冲液中数小时即可大幅衰减，褐变时 420~460 nm 吸光度上升[1] [9]。接糖后稳定性提高，机制可归纳为四点。第一，每个 *α*-葡萄糖基引入多个氢键供体/受体，水溶性可提高一至两个数量级[6] [7] [22]。第二，占据邻苯三酚或没食子酰基上的部分羟基，直接减少最易氧化的位点，从而减缓自氧化、EGCG→GCG 差向异构和褐变[13] [14]。第三，糖基的水化层与位阻妨碍氧气和铜、铁离子靠近剩余酚羟基。第四，这一效应并非普遍：*β*-木糖苷的热稳定性可以低于母体，说明糖的种类、连接方式和位点必须同时考虑[18]。

定量方面，Gonzalez-Alfonso 等证明 3′-和 7-O-*α*-葡萄糖苷的 pH 稳定性和热稳定性均优于 EGCG [13]。Yang 等在 50℃磷酸盐缓冲液中连续测定 16 d：pH 5 时 EGCG-2G 残留 91.87%，EGCG 仅 7.05%；pH 6 时 EGCG-2G 仍有 75.01%，EGCG 几乎耗尽(0.23%) [7]。对即饮茶杀菌、喷雾干燥和常温货架期，这一差别具有工艺意义。图 2 按产物类型汇总了溶解倍数、加速残留、转化率/滴度及位点构效的序数比较。图 2(a)四组分别为葡聚糖蔗糖酶早期产物的最大溶解倍数(114 倍) [22]、后续新糖苷的最大倍数(367 倍) [6]、SP 法 EGCG-2G (124 倍) [7]以及化学法 *β*-糖苷(31 倍) [8]；各组 EGCG 溶解度基线分别为约 5.1 mmol/L 与 16.1 mmol/L，不可合并统计。图 2(b)为同一加速试验(50℃磷酸盐缓冲液，16 d)中 EGCG 与 EGCG-2G 的残留率[7]。图 2(c)由下至上依次为 CGTase 3′-G (58%) [15]、葡聚糖蔗糖酶混合物(91%) [6]、SmSP 4′-G (81%, 10 g/L) [19]、LmSP M3 补料 4′-G (92%, 31.1 g/L) [20]、SP 法 2G (98%) [7]及 SmSP_LoopB 4″-G (83%, 16.9 g/L, 4 h) [21]。图 2(d)为基于上述文献的工艺的综合评价。

就产品形态而言，糖基化 EGCG 较匹配中性或弱酸性即饮茶和功能饮料，冷藏或常温褐变会减轻；固体饮料和压片的冲调澄清度、喷干热损失也会改善；与维生素 C、矿物质复配时，金属离子催化氧化会弱一些。接糖不能替代整个体系的保护：pH 偏高、溶氧高、铜铁离子多时，剩余游离酚羟基仍会氧化。与纳米包埋相比，糖苷是分子本身，喷干、复溶、澄清更好控制；与自组装相比，不依赖载体蛋白的等电点和盐浓度[11] [17]。也可以先做成糖苷，再视需要进入乳液或纳米粒。酰化(如 EGCG 棕榈酸酯)提高脂

溶性和膜亲和力，糖基化提高水溶性和加工稳定性，甲基化改变代谢途径：水性饮料更适合糖基化，含油体系可考虑酰化或自组装[10] [16] [17]，三者是互补关系而非互斥。

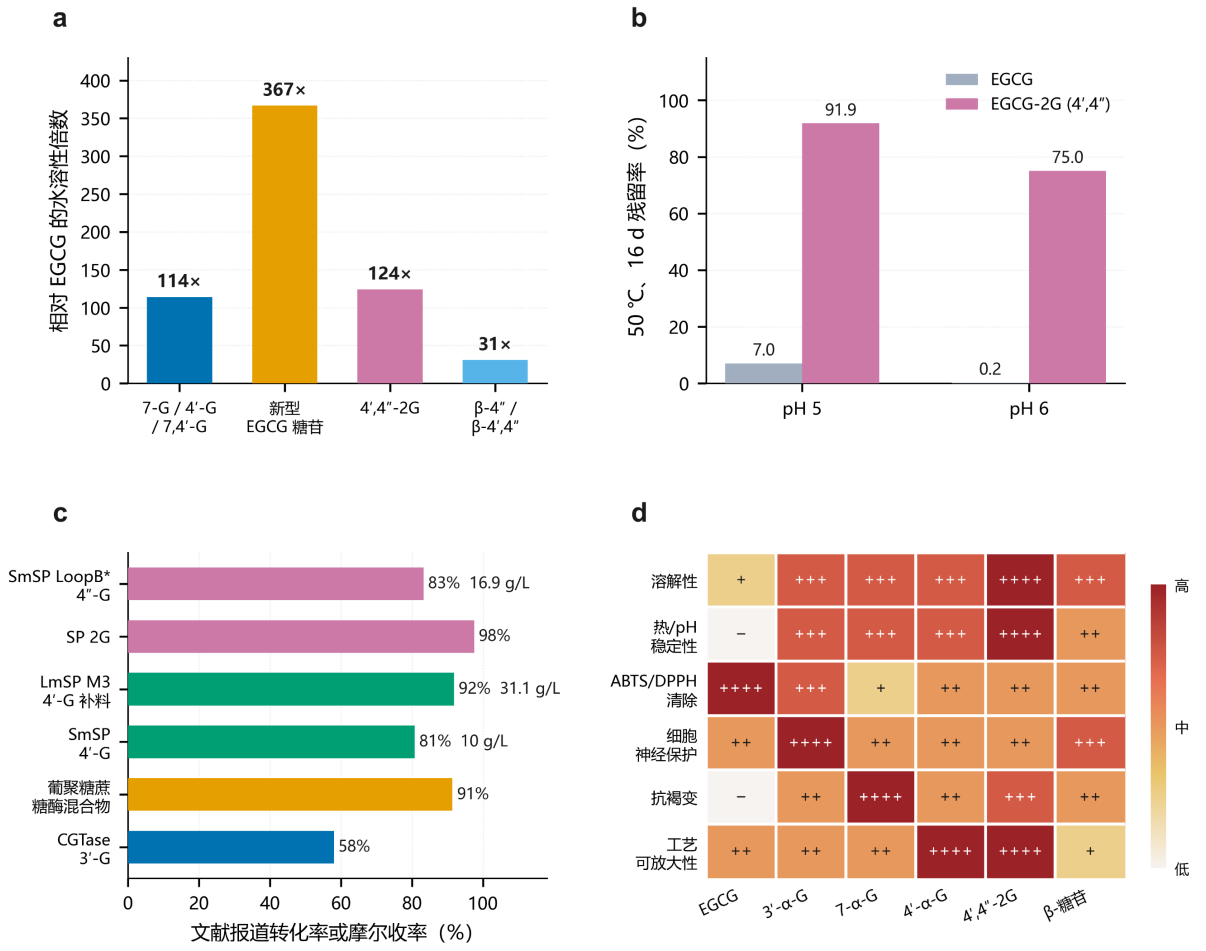


Figure 2. Effects of glycosylation on the solubility, accelerated stability, conversion rate and structure–activity relationships of EGCG

图 2. 糖基化对 EGCG 溶解性、加速稳定性、转化率及构效关系的影响

5. 吸收利用、感官与生物活性

茶儿茶素口服吸收差，是体外数据与人体结果不对齐的重要原因[1] [9] [10]。纳米递送、结构修饰和联合用药均有报道[2] [4] [5] [9] [11] [12]。接糖以后水溶性和化学稳定性提高，胃肠道中尚未降解的分子理论上会增多；糖基是否改变跨膜方式、外排泵识别以及菌群代谢，目前缺乏直接药代数据。必须分开三层证据，并与“生物可及性/生物利用度”术语对齐：(1) 溶解与加速稳定性——证据充分，构成生物可及性的前提[7] [13] [14]；(2) 细胞水平活性——有位点特异性数据[7] [13] [18]；(3) 动物/人体药代(生物利用度)——结构明确的 EGCG 糖苷几乎空白。纳米递送游离 EGCG 至少有啮齿类 AUC 数据(*β*-环糊精纳米粒约 1.71 倍[11]，TPGS/泊洛沙姆胶束约 2.27 倍[12])，这些数字不能转移到糖苷分子上。关于 EGCG 糖苷在肠道中可能命运(酶解、菌群代谢、完整吸收)的系统讨论及针对性研究设计，见 5.1 节。

Yang 等观察到 EGCG-2G 的抗氧化、抗炎和抑制黑色素合成不弱于母体，美白可能与 MC1R/cAMP/MITF 通路有关[7]；Gonzalez-Alfonso 等在神经元氧化损伤模型中看到 3′-糖苷优于 EGCG

[13]；β-糖苷在抗增殖和神经保护上可以优于母体[18]。上述结果只说明细胞水平上活性仍在，不能直接写成人体 AUC 提高了若干倍。就现有数据而言，B 环 3′或 4′的单糖苷比较容易在稳住分子的同时保留细胞水平的抗氧化和神经保护[13] [19] [20]；二糖苷把溶解和存放做得很好，抗炎、美白仍可测到，但活性基团挡得太多时需谨慎[7]；A 环 7-位成苷抗氧化下降较明显，抗褐变更有利[6] [13]；β-构型在抗增殖和神经保护上可以优于母体，抗氧化略降[18]。表 2 中总结了更多代表性 EGCG 糖苷的生物活性变化。开发功能食品时应按目标功能选位点，不必单纯追求转化率或溶解度。

苦涩主要来自酚羟基与唾液富脯氨酸蛋白的疏水和氢键结合。部分羟基被糖占据后，结合位点减少，涩味常下降，这与 Kim 等 7-OH 成苷改变蛋白作用、抗褐变变好相一致[6]，也与 Noguchi 等 C5-葡萄糖苷降低涩味的观察相符[23]。减涩幅度随位点和糖个数而变，开发时仍须做感官定量，不能只凭结构推断。

Table 2. Properties of representative EGCG glucosides
表 2. 代表性 EGCG 糖苷的性质

结构	位点/构型	溶解性(相对 EGCG)	稳定性	生物活性
EGCG-3′-O-α-Glc	B 环 C3′，α	提高(未以倍数单列)	热/pH 优于 EGCG	SH-SY5Y 保护 2.75 倍 (EGCG 约 1.7 倍) [13] [15]
EGCG-7-O-α-Glc	A 环 C7，α	约 49 倍[22]	热/pH 优于 EGCG	抗氧化损失大于 3′-G；抗褐变较好[6] [13] [22]
EGCG-4′-O-α-Glc	B 环 C4′，α	市售 EGCG-1G 对照	优于 EGCG，弱于 2G	SP 主产物；补料 31.11 g/L [7] [14] [19] [20]
EGCG-4″-O-α-Glc	D 环 C4″，α	早期约 69 倍[25]	稳定性优于母体	loop 交换后 4 h 收率 83.3% [14] [21] [25]
EGCG-5-O-α-Glc	A 环 C5，α	提高	热稳定性提高	涩味下降[23]
EGCG-4′,4″-O-α-2G	C4′ + C4″，α	约 124 倍	50℃、pH 5、16 d 残留 91.87%	抗炎、美白仍可测[7] [14]
β-4″-G/β-4′,4″-2G	D 环，β (化学法)	约 15 倍/31 倍	水溶液更稳定	乳腺癌细胞有抑制[8]
β-Glc/β-Sop/β-Xyl	5″或 4″，β	23~44 倍	葡萄糖苷热稳定性改善；木糖苷可更差	抗增殖、神经保护可优于 EGCG [18]

EGCG 糖苷在肠道中的命运

结构明确的 EGCG 糖苷尚缺乏直接的消化道命运与药代数据，但黄酮 O-糖苷和花色苷糖苷的吸收代谢研究为外推提供了可用框架。按引言中的术语，糖基化提高溶解性与化学稳定性，直接改善的是生物可及性；生物利用度是否同步提高，取决于糖苷在消化道中被酶解、被菌群代谢，还是以完整分子被吸收[29]-[32]；总地来说其有以下几种可能得命运：

(1) 小肠上皮酶解。天然黄酮 O-葡萄糖苷在小肠主要经乳糖根皮苷水解酶(LPH)和胞质 β-葡萄糖苷酶(CBG)去糖基后以苷元形式吸收，并涉及己糖转运途径对部分糖苷的摄取[29]。CGTase、葡聚糖蔗糖酶和 SP 得到的 EGCG 糖苷多为 α-O-葡萄糖苷[6] [7] [13]-[15]，其是否为 LPH/CBG 的底物尚无直接证据；但小肠刷状缘 α-葡萄糖苷酶(麦芽糖酶－葡萄糖淀粉酶、蔗糖酶－异麦芽糖酶)可水解 α-糖苷键，α-EGCG 糖苷在小肠被去糖基、以游离 EGCG 形式吸收的可能性不能排除。工程化糖苷酶所得 β-糖苷在构型上更接近天然黄酮糖苷，更可能经 LPH/CBG 途径处理[18] [29]。二糖苷(EGCG-2G)位阻更大，先被修剪为单糖

苷或苷元的概率高于完整跨膜。若上述酶解成立，糖基化的主要贡献在于提高生物可及性(更多分子以可吸收形式到达上皮)，而非改变吸收化学形态。

(2) 完整吸收。花色苷中的矢车菊素-3-葡萄糖苷等存在经胃或小肠完整吸收的报道，涉及 SGLT1 及胃黏膜途径，但完整分子占口服剂量的比例通常很低，且受分析方法灵敏度制约[30]。^{13}C 示踪研究表明，人体摄入 ^{13}C-矢车菊素-3-葡萄糖苷后，全身暴露以微生物裂解产物为主，母体糖苷贡献有限[30]。据此推测，EGCG 单糖苷的完整吸收即使存在，对全身暴露的贡献也可能有限；EGCG-2G 及 β-槐糖苷等更大糖苷完整吸收的可能性更低。糖基化对 SGLT1、P-gp、MRP2 等转运体的识别差异，目前没有 EGCG 糖苷数据。

(3) 菌群代谢。未在小肠吸收的糖苷进入结肠后，细菌糖苷酶先切断糖苷键，苷元再经开环、脱羟基等反应生成小分子酚酸；花色苷的典型肠道代谢产物包括原儿茶酸等[30] [31]；EGCG 苷元可生成 5-(3′,4′,5′-三羟基苯基)-γ-戊内酯等戊内酯类及进一步裂解的酚酸[31] [32]。EGCG 糖苷(尤其 α-苷)是否会延迟结肠释放、改变菌群底物谱及代谢物比例，几乎未知。茯砖茶冠突散囊菌可对 EGCG 进行水解与再糖基化[28]，提示微生物糖苷酶对 EGCG 酚羟基的可及性并不低，α/β-EGCG 糖苷在结肠被迅速去糖基的可能性较大。

针对上述不确定性，建议按以下顺序补数据：(1) 消化模型，按 INFOGEST 共识在胃肠阶段加入 LPH、CBG 及 α-葡萄糖苷酶组合，平行测定 EGCG、EGCG-3′-G/4′-G/4″-G 和 EGCG-2G 的水解速率与残留，区分“生物可及性提高”与“抗消化稳定”两种不同结局[33]；(2) 转运与代谢，Caco-2 及 Caco-2/HT29-MTX 共培养比较表观渗透系数与细胞内外代谢物，区分完整转运与去糖基后苷元转运[29]；(3) 菌群转化，人粪便厌氧孵育或 SHIME 类结肠模型，结合靶向代谢组学鉴定特征代谢物，并与游离 EGCG 平行对照[31] [32]；(4) 体内示踪，^{13}C 标记 EGCG-4′-G 与 EGCG-2G 的微剂量药代，外周血(必要时门静脉)同步定量“完整糖苷－游离 EGCG 及结合型代谢物－微生物代谢物”三类暴露[30]；(5) 构型对照，α 与 β、单糖苷与二糖苷、不同位点在同一消化－转运－菌群体系中平行比较。完成上述层次后，才能判断糖基化提升的仅是生物可及性，还是可转化为生物利用度的净增益。

6. 食品应用与法规路径

茶多酚和 EGCG 已广泛用于茶饮料、固体饮料、口腔护理、抗氧化复方和化妆品。糖苷化的工艺价值，在于缓解“难溶、易褐、难存、味苦”，同时尽量保留原有活性。即饮和浓缩茶在中性 pH 下 EGCG 衰减快，1G 或 2G 有助于巴氏或 UHT 后的保留，护色剂用量可以下降。固体饮料和粉剂冲调更澄清，喷干热损失更小[7] [13]。口腔护理中儿茶素有抑菌和抗膜报道，接糖后水溶性和色泽更稳定，漱口水、含片更好做。EGCG-2G 有抗黑素生成数据[7]，可与茶多酚在皮肤氧化应激上的用法对照[3]。分子改性和纳米、自组装可以联用：前者改分子本身，后者管释放和靶向[4] [10] [11] [17]。

法规层面，茶多酚、茶叶提取物在中国可按普通食品或相关新资源路径管理。定向制成 EGCG-1G、EGCG-2G 后，结构已是新分子，继续按“茶多酚”申报不一定成立；纯度、残留酶、蔗糖或淀粉来源以及毒理需要单独评估。EGCG 本身的有效剂量和安全上限已有综述[2]。欧洲食品安全局(EFSA)对绿茶儿茶素的科学意见指出，食品补充剂中≥800 mg EGCG/d 的摄入与血清转氨酶升高相关[34]。糖苷产品不得直接套用游离 EGCG 的这一关注剂量，因为吸收、代谢和肝暴露都可能改变。高剂量绿茶提取物的肝安全性问题，对糖苷原料同样构成需要单独回答的监管问题。

7. 关键瓶颈与研究展望

酶法现在能做到较高滴度，但以下几件事仍然卡住从论文到食品原料的转化。

第一，选择性。野生酶产物经常是混合物。2025~2026 年对 SP 做环区和隧道突变后，主产物可以从 4′转到 4″，EGCG-G1 补料也能做到 30 g/L 以上[19]-[21]，选择性主要还得靠改酶。用蔗糖、淀粉做供体的糖苷水解酶接黄酮，产物种类会更多，制备上也好落地[35]，但“混合物配料”和“可标识单体”是两条产品逻辑，不宜混用同一套转化率去宣传。

第二，底物保护。转化率高的前提是 EGCG 在反应过程中没有先氧化。弱酸、抗氧化剂和低氧应当写入规程，不能只优化酶浓度和蔗糖比。

第三，食品级酶。重组 SP、CGTase 能否进入普通食品，取决于菌种来源、使用目的和残留蛋白。*S. mutans* 来源酶即便催化性能优异，食品用途的菌种评估也比食品级乳酸菌来源更敏感。淀粉、麦芽糊精做供体比高浓度蔗糖便宜，CGTase 在原料成本上仍有优势。

第四，药代与感官。稳定性与溶解数据已经不少，人体药代和感官定量还少；糖基化目前较稳妥的表述是提高稳定性与生物可及性，生物利用度是否提高尚无直接证据。比较合适的做法是取结构明确的 EGCG-3′-G、EGCG-4′-G、EGCG-4″-G 和 EGCG-2G，在同一套实验中比较溶解、贮存、体外消化、Caco-2 转运、菌群转化、动物药代和耐受，再决定是否进入人体微剂量研究。在此之前，不宜在摘要或结论中使用“提高生物利用度”作为已证实的效果。

第五，下游产品。单糖苷适合做能标示结构的单体原料，寡糖苷适合高溶解、高稳定的饮料配料，双酶级联或全细胞可以压低酶成本和分离负荷。ECG、EGC、茶黄素的平行接糖，以及与罗汉果甜苷、蛋白肽的风味复配，可以在产品端试验，但应与 EGCG 糖苷的构效数据分开报道。

8. 结论

EGCG 的活性报道很多，真正做成饮料或粉剂时，不稳定和吸收差仍是主要限制。酶法糖基化条件温和，水溶性和热、pH 稳定性可以提高，活性留多少则取决于接到哪个羟基、接几个糖、α 还是 β。CGTase 主产物较集中，葡聚糖蔗糖酶转化率高但异构体多，蔗糖磷酸化酶经酶工程后，EGCG-4′-单糖苷和 4′,4″-二糖苷已经能做到较高滴度和较清楚的结构，4″-单糖苷也可在小时级反应中拿到，相对更接近放大。分子改性和纳米、自组装不是互斥的：前者解决分子在加工中的化学命运，后者解决载体层面的释放。接下来比较实际的，是把酶的选择性、反应过程中的氧、食品级放大，以及结构明确糖苷的动物/人体药代这几件事补上。

参考文献

[1] Gan, R.Y., Li, H.B., Sui, Z.Q. and Corke, H. (2018) Absorption, Metabolism, Anti-Cancer Effect and Molecular Targets of Epigallocatechin Gallate (EGCG): An Updated Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **58**, 924-941. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1231168

[2] Niu, L., Luo, Y., Xie, W., Wang, C. and Liu, Z. (2026) Dietary (−)-Epigallocatechin Gallate (EGCG): State-of-the-Art Advances in Bioactivities, Bioavailability Enhancement Strategies, and Applications in Nutrition and Health. *Nutrients*, **18**, Article 317. https://doi.org/10.3390/nu18020317

[3] Rovaldi, E., Di Donato, V., Paolino, G., Bruno, M., Medei, A., Nisticò, S.P., *et al.* (2025) Epigallocatechin-Gallate (EGCG): An Essential Molecule for Human Health and Well-Being. *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, Article 9253. https://doi.org/10.3390/ijms26189253

[4] Qutub, M., Hussain, U.M., Tatode, A., Premchandani, T., Khan, R., Umekar, M., *et al.* (2025) Nano-Engineered Epigallocatechin Gallate (EGCG) Delivery Systems: Overcoming Bioavailability Barriers to Unlock Clinical Potential in Cancer Therapy. *AAPS PharmSciTech*, **26**, Article No. 137. https://doi.org/10.1208/s12249-025-03145-0

[5] Khan, A.U.R., Khan, M.Z., Ahmad, A., Li, J. and Song, L. (2025) Unlocking the Biomedical Potential of Epigallocatechin-3-Gallate: A Review on Bioactive Properties, Stability Limitations, and Nano-Delivery Innovations. *Natural Product Research*, **2025**, 1-23. https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2601259

[6] Kim, J., Nguyen, T.T.H., Kim, N.M., Moon, Y., Ha, J., Park, N., *et al.* (2016) Functional Properties of Novel

Epigallocatechin Gallate Glucosides Synthesized by Using Dextransucrase from Leuconostoc Mesenteroides B-1299CB4. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **64**, 9203-9213. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04236

[7] Yang, B., Zhu, N., Huang, Y., Deng, J., Yu, M., Yan, X., *et al*. (2026) Enzymatic Preparation of Epigallocatechin Gallate Diglucoside and Bioactivity Assessment. *AMB Express*, **16**, Article No. 25. https://doi.org/10.1186/s13568-026-02014-8

[8] Zhang, X., Wang, J., Hu, J.M., *et al*. (2016) Synthesis and Biological Testing of Novel Glucosylated Epigallocatechin Gallate (EGCG) Derivatives. *Molecules*, **21**, Article 620. https://doi.org/10.3390/molecules21050620

[9] Cai, Z.Y., Li, X.M., Liang, J.P., *et al*. (2018) Bioavailability of Tea Catechins and Its Improvement. *Molecules*, **23**, Article 2346. https://doi.org/10.3390/molecules23092346

[10] Dai, W., Ruan, C., Zhang, Y., Wang, J., Han, J., Shao, Z., *et al*. (2020) Bioavailability Enhancement of EGCG by Structural Modification and Nano-Delivery: A Review. *Journal of Functional Foods*, **65**, Article 103732. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103732

[11] Cui, L., Liu, B., Ling, Z., Liu, K., Tan, S., Gong, Z., *et al*. (2025) Characterization of Physicochemical Properties of Different Epigallocatechin-3-Gallate Nanoparticles and Their Effect on Bioavailability. *Food Chemistry*, **480**, Article 143935. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143935

[12] Wong, C.N., Liew, K.B., Lim, Y.M., Chew, Y., Chua, A., Yang, S., *et al*. (2025) Development and Characterization of EGCG-Loaded TPGS/Poloxamer 407 Micelles with Evaluation of *in Vitro* Drug Release and *in Vivo* Pharmacokinetics and Tolerability Observations Following Oral Administration. *Pharmaceutics*, **17**, Article 1441. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17111441

[13] Gonzalez-Alfonso, J.L., Peñalver, P., Ballesteros, A.O., Morales, J.C. and Plou, F.J. (2019) Effect of A-Glucosylation on the Stability, Antioxidant Properties, Toxicity, and Neuroprotective Activity of (–)-Epigallocatechin Gallate. *Frontiers in Nutrition*, **6**, Article 30. https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00030

[14] Kitao, S., Matsudo, T., Saitoh, M., Horiuchi, T. and Sekine, H. (1995) Enzymatic Syntheses of Two Stable (–)-Epigallocatechin Gallate-Glucosides by Sucrose Phosphorylase. *Bioscience*, *Biotechnology*, *and Biochemistry*, **59**, 2167-2169. https://doi.org/10.1271/bbb.59.2167

[15] Gonzalez-Alfonso, J.L., Leemans, L., Poveda, A., Jimenez-Barbero, J., Ballesteros, A.O. and Plou, F.J. (2018) Efficient *α*-Glucosylation of Epigallocatechin Gallate Catalyzed by Cyclodextrin Glucanotransferase from Thermoanaerobacter Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **66**, 7402-7408. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02143

[16] 尹小明, 阮文浩, 张玺, 高艺航, 黄清坤. 植物多酚在食品中的应用和研究进展[J]. 食品与营养科学, 2024, 13(4): 367-374.

[17] 尹小明, 高艺航, 阮文浩, 张玺, 徐义明. 自组装工艺在药食同源功能食品中的应用[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(6): 782-791.

[18] Méndez-Líter, J.A., Pozo-Rodríguez, A., Madruga, E., Rubert, M., Santana, A.G., de Eugenio, L.I., *et al*. (2022) Glycosylation of Epigallocatechin Gallate by Engineered Glycoside Hydrolases from *Talaromyces amestolkiae*: Potential Antiproliferative and Neuroprotective Effect of These Molecules. *Antioxidants*, **11**, Article 1325. https://doi.org/10.3390/antiox11071325

[19] Chen, X., Tong, J., Chen, K., Ma, R., Gao, Z., Li, Y., *et al*. (2025) Identification of a Sucrose Phosphorylase Variant from Streptococcus Mutans for Production of Epigallocatechin Gallate Glucosides. *Journal of Biotechnology*, **401**, 21-31. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2025.02.004

[20] Tong, J., Chen, X., Chen, K., *et al*. (2026) Designing a Sucrose Phosphorylase from *Leuconostoc mesenteroides* for the Highly Selective Production of EGCG-4'-O-*α*-D-Glucopyranoside. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **74**, 6374-6385. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c14771

[21] Chen, X., Tong, J., Chen, K., Wu, X., Altaf, H., Wei, M., *et al*. (2026) Precision Engineering of a Loop-Exchanged Variant of Sucrose Phosphorylase from *Streptococcus mutans* Enables Regioselective 4″-O-Glucosylation of Epigallocatechin Gallate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **74**, 18872-18886. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6c03565

[22] Moon, Y.H., Lee, J.H., Ahn, J.S., Nam, S.H., *et al*. (2006) Synthesis, Structure Analyses, and Characterization of Novel Epigallocatechin Gallate (EGCG) Glycosides Using the Glucansucrase from *Leuconostoc mesenteroides* B-1299CB. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **54**, 1230-1237. https://doi.org/10.1021/jf052359i

[23] Noguchi, A., Inohara-Ochiai, M., Ishibashi, N., Fukami, H., Nakayama, T. and Nakao, M. (2008) A Novel Glucosylation Enzyme: Molecular Cloning, Expression, and Characterization of Trichoderma Viride JCM22452 *α*-Amylase and Enzymatic Synthesis of Some Flavonoid Monoglucosides and Oligoglucosides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56**, 12016-12024. https://doi.org/10.1021/jf801712g

[24] Ke, J., Jiang, C., Lai, G., Liu, X., Qin, X., Wen, M., *et al*. (2025) Flavone Glycosides of Tea: Structure, Isolation, Identification, Health Benefit and Sensory Property. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **24**, e70249.

https://doi.org/10.1111/1541-4337.70249

[25] Moon, Y., Kim, G., Lee, J., Jin, X., Kim, D. and Kim, D. (2006) Enzymatic Synthesis and Characterization of Novel Epigallocatechin Gallate Glucosides. *Journal of Molecular Catalysis B*: *Enzymatic*, **40**, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2006.01.030

[26] Klingel, T., Hadamjetz, M., Fischer, A. and Wefers, D. (2019) Glucosylation of Flavonoids and Flavonoid Glycosides by Mutant Dextransucrase from Lactobacillus Reuteri TMW 1.106. *Carbohydrate Research*, **483**, Article 107741. https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.107741

[27] Li, X., Meng, X., de Leeuw, T.C., te Poele, E.M., Pijning, T., Dijkhuizen, L., *et al*. (2023) Enzymatic Glucosylation of Polyphenols Using Glucansucrases and Branching Sucrases of Glycoside Hydrolase Family 70. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **63**, 5247-5267. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2016598

[28] Fan, Z., Qing, Q., Yin, J., He, C., Hu, Y., Chen, Y., *et al*. (2025) Metabolites of Epigallocatechin Gallate and Changes in Antioxidant Activity through Biotransformation with *Eurotium cristatum* during Liquid-State Fermentation. *Food Chemistry*: *X*, **29**, Article 102618. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102618

[29] Nemeth, K., Plumb, G.W., Berrin, J.G., *et al*. (2003) Deglycosylation by Small Intestinal Epithelial Cell *β*-Glucosidases Is a Critical Step in the Absorption and Metabolism of Dietary Flavonoid Glycosides in Humans. *European Journal of Nutrition*, **42**, 29-42. https://doi.org/10.1007/s00394-003-0397-3

[30] Czank, C., Cassidy, A., Zhang, Q., Morrison, D.J., Preston, T., Kroon, P.A., *et al*. (2013) Human Metabolism and Elimination of the Anthocyanin, Cyanidin-3-Glucoside: A 13c-Tracer Study. *The American Journal of Clinical Nutrition*, **97**, 995-1003. https://doi.org/10.3945/ajcn.112.049247

[31] Williamson, G. and Clifford, M.N. (2010) Colonic Metabolites of Berry Polyphenols: The Missing Link to Biological Activity? *British Journal of Nutrition*, **104**, S48-S66. https://doi.org/10.1017/s0007114510003946

[32] Takagaki, A. and Nanjo, F. (2010) Metabolism of (−)-Epigallocatechin Gallate by Rat Intestinal Flora. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **58**, 1313-1321. https://doi.org/10.1021/jf903375s

[33] Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., *et al*. (2014) A Standardised Static *in Vitro* Digestion Method Suitable for Food—An International Consensus. *Food Function*, **5**, 1113-1124. https://doi.org/10.1039/c3fo60702j

[34] EFSA ANS Panel (EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to Food) (2018) Scientific Opinion on the Safety of Green Tea Catechins. *EFSA Journal*, **16**, Article 5239.

[35] Tian, Y., Xu, W., Guang, C., Zhang, W. and Mu, W. (2024) Glycosylation of Flavonoids by Sucrose- and Starch-Utilizing Glycoside Hydrolases: A Practical Approach to Enhance Glycodiversification. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **64**, 7408-7425. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2185201