

郑建仙 主编

功能性糖醇



Chemical Industry Press



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

功能性糖醇/郑建仙主编. —北京:化学工业出版社, 2005.3

ISBN 7-5025-6745-3

I. 功… II. 郑… III. 糖醇 IV. TQ351.37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018071 号

功能性糖醇

郑建仙 主编

责任编辑:刘俊之

文字编辑:丁建华 彭爱铭

责任校对:郑捷

封面设计:关飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 343 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6745-3/TS·257

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

《功能性糖醇》编委会

主 编 郑建仙

参加编写人员（排名不分先后）

郑建仙 袁尔东 徐 俊 王伟江 徐 璐 杨程芳
宿保峰 鲍元兴 耿立萍 汪 园 曹 中 邱 洁

前 言

功能性糖醇是由相应的糖加氢而制得，主要有木糖醇、赤藓糖醇、乳糖醇、山梨醇、甘露醇、麦芽糖醇、氢化淀粉水解物、异麦芽糖醇和低聚异麦芽糖醇。功能性糖醇具有如下的生理功效：

① 它在人体中的代谢途径与胰岛素无关，摄入后不会引起血液葡萄糖与胰岛素大幅度的波动，可用于糖尿病人的专用食品；

② 它不是口腔微生物（特别是变异链球菌）的适宜作用底物，有些糖醇（如木糖醇）甚至可抑制变异链球菌的生长繁殖，故长期摄入糖醇不会引起牙齿龋变；

③ 部分多元糖醇（如乳糖醇）的代谢特性类似膳食纤维，具备膳食纤维的部分生理功能，诸如预防便秘、改善肠道菌群体系和预防结肠癌的发生等。

相比于对应糖类的物化性质，功能性糖醇的共同特点表现在：

① 甜度较低，黏度较低，能量值较低；

② 吸湿性较大，但甘露醇和异麦芽糖醇的吸湿性小；

③ 不参与美拉德反应，需配合其他甜味剂才能应用于焙烤食品。

目前功能性糖醇的工业化生产，除赤藓糖醇外，大多是在高温、高压条件下利用 Ni 作为催化剂氢化相应糖而得。这个过程工艺复杂，分离精制任务重。近年来，生物技术在功能性糖醇生产方面的应用有了发展，利用微生物发酵法生产是一个重要的发展方向。

功能性糖醇近些年来备受关注，发展迅速。人们寄希望于它在促进人体自身健康、促进传统食品工业的高新技术改造、促进廉价农副产品的高附加值转化等方面，发挥重要的作用。为系统总结本领域的最新科技成果，主编邀请了 12 位科技工作者加盟，经过一年多的辛勤努力，共同编著了本书。

由于该领域的发展日新月异，为了尽可能反映当今国际的研究全貌和技术水准，作者利用国际互联网技术广泛参考国外同行最新的研究文献。本书所描述的科学原理，所列举的研究数据和图表，所概括的科学结论，来自全世界的研究工作。作者谨向所有为本书积累原始素材的学者们，致以崇高的敬意！

本书是在全体参编人员通力合作下完成的，得到了化学工业出版社的鼎力支持，主编在此深表谢意！不妥之处，敬请来电 020-87112278，或 E-mail: fejsxzhen@scut.edu.cn 批评指正。

郑建仙

2004 年 12 月于华南理工大学

目 录

第一章 木糖醇	1
第一节 木糖醇的物化性质和生理功效.....	1
一、木糖醇的物化性质.....	1
二、木糖醇的代谢.....	5
三、木糖醇的生理功效.....	7
四、木糖醇的安全毒理学分析.....	9
第二节 木糖醇的生产技术.....	9
一、木糖醇的氢化法生产技术.....	10
二、木糖醇的发酵法生产技术.....	13
第三节 木糖醇的分析和应用技术.....	19
一、木糖醇的分析技术.....	20
二、木糖醇的应用技术.....	22
参考文献.....	25
第二章 赤藓糖醇	28
第一节 赤藓糖醇的物化性质和生理功效.....	28
一、赤藓糖醇的物化性质.....	29
二、赤藓糖醇的代谢.....	32
三、赤藓糖醇的生理功效.....	36
四、赤藓糖醇的安全毒理学分析.....	39
第二节 赤藓糖醇的生产技术.....	59
一、生产赤藓糖醇的菌种.....	59
二、赤藓糖醇的发酵法生产技术.....	62
第三节 赤藓糖醇的分析和应用技术.....	65
一、赤藓糖醇的分析技术.....	65
二、赤藓糖醇的应用技术.....	66
参考文献.....	68

第三章 乳糖醇	73
第一节 乳糖醇的物化性质与生理功效	73
一、乳糖醇的物化性质	73
二、乳糖醇的代谢	80
三、乳糖醇的生理功效	82
四、乳糖醇的安全毒理学分析	93
第二节 乳糖醇的生产技术	97
一、乳糖醇糖浆的生产技术	98
二、结晶乳糖醇的生产技术	99
第三节 乳糖醇的分析和应用技术	105
一、乳糖醇的分析技术	105
二、乳糖醇的应用技术	106
参考文献	112
第四章 山梨醇	114
第一节 山梨醇的物化性质和生理功效	114
一、山梨醇的物化性质	115
二、山梨醇的代谢	116
三、山梨醇的生理功效	118
四、山梨醇的安全毒理学分析	120
第二节 山梨醇的生产技术	124
一、山梨醇的氢化法生产技术	124
二、山梨醇的电化学法生产技术	130
三、山梨醇的发酵法生产技术	133
第三节 山梨醇的分析和应用技术	140
一、山梨醇的分析技术	140
二、山梨醇的应用技术	142
参考文献	145
第五章 甘露醇	147
第一节 甘露醇的物化性质和生理功效	147
一、甘露醇的物化性质	148
二、甘露醇的代谢	148
三、甘露醇的生理功效	149
四、甘露醇的安全毒理学分析	150
第二节 甘露醇的生产技术	154

一、甘露醇的乳酸菌发酵法生产技术·····	154
二、甘露醇的膜式细胞循环法生产技术·····	159
三、甘露醇的酵母厌氧发酵法生产技术·····	162
四、发酵法生产甘露醇的基因工程学·····	169
五、甘露醇的提取法生产技术·····	172
六、甘露醇的氢化法生产技术·····	174
七、甘露醇的电化学法生产技术·····	176
第三节 甘露醇的分析和应用技术·····	177
一、甘露醇的分析技术·····	178
二、甘露醇的应用技术·····	179
参考文献·····	180
第六章 麦芽糖醇 ·····	182
第一节 麦芽糖醇的物化性质和生理功效·····	182
一、麦芽糖醇的物化性质·····	183
二、麦芽糖醇的代谢·····	186
三、麦芽糖醇的生理功效·····	187
四、麦芽糖醇的安全毒理学分析·····	193
第二节 麦芽糖醇的生产技术·····	196
一、高纯度麦芽糖浆的生产技术·····	197
二、高纯度麦芽糖浆的氢化技术·····	199
第三节 麦芽糖醇的分析和应用技术·····	199
一、麦芽糖醇的分析技术·····	200
二、麦芽糖醇的应用技术·····	201
参考文献·····	203
第七章 氢化淀粉水解物 ·····	205
第一节 氢化淀粉水解物的物化性质和生理功效·····	205
一、氢化淀粉水解物的物化性质·····	205
二、氢化淀粉水解物的生理功效·····	208
三、氢化淀粉水解物的安全毒理学分析·····	210
第二节 氢化淀粉水解物的生产技术·····	212
一、淀粉的水解技术·····	212
二、淀粉水解糖浆的氢化技术·····	214
第三节 氢化淀粉水解物的分析和应用技术·····	215
一、氢化淀粉水解物的分析技术·····	215

二、氢化淀粉水解物的应用技术·····	217
参考文献·····	218
第八章 异麦芽糖醇 ·····	220
第一节 异麦芽糖醇的物化性质和生理功效·····	220
一、异麦芽糖醇的物化性质·····	220
二、异麦芽糖醇的甜味特性·····	226
三、异麦芽糖醇的代谢·····	227
四、异麦芽糖醇的生理功效·····	231
五、异麦芽糖醇的安全毒理学分析·····	234
第二节 异麦芽糖醇的生产技术·····	238
一、异麦芽酮糖的酶法生产技术·····	238
二、异麦芽糖醇的氢化法生产技术·····	243
第三节 异麦芽糖醇的分析和应用技术·····	245
一、异麦芽糖醇的分析技术·····	245
二、异麦芽糖醇的应用技术·····	246
参考文献·····	250
第九章 低聚异麦芽糖醇 ·····	252
第一节 低聚异麦芽糖醇的物化性质和生理功效·····	252
一、低聚异麦芽糖醇的代谢·····	252
二、低聚异麦芽糖醇的生理功效·····	254
三、低聚异麦芽糖醇的安全毒理学分析·····	261
第二节 低聚异麦芽糖醇的生产技术·····	263
一、低聚异麦芽糖的酶法生产技术·····	263
二、低聚异麦芽糖醇的氢化法生产技术·····	266
第三节 低聚异麦芽糖醇的分析和应用技术·····	268
一、低聚异麦芽糖醇的分析技术·····	268
二、低聚异麦芽糖醇的应用技术·····	269
参考文献·····	271

木糖醇 (xylitol) 是一种最常见的多元糖醇, 由于它不是牙斑微生物的有效作用底物, 因此对防止牙齿龋变有效。还由于它的代谢与胰岛素无关, 因此适用于糖尿病患者食品, 还可作为人体非肠道营养的能量来源。由于木糖醇这些独特的代谢特性, 自 20 世纪 60 年代起就开始应用于食品生产上。

第一节 木糖醇的物化性质和生理功效

木糖醇的分子式为 $C_5H_{12}O_5$, 相对分子质量为 152.15, 化学结构如图 1-1 所示。它是一种无味的白色结晶粉末状物质, 具有清凉甜味, 一般认为它的甜度与蔗糖一样。木糖醇是人体葡萄糖代谢过程中的正常中间产物, 在各种水果、蔬菜中也有少量的存在。

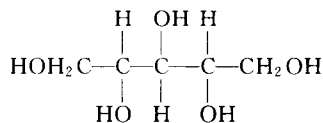


图 1-1 木糖醇的化学结构

一、木糖醇的物化性质

表 1-1 所列为木糖醇的主要物化性质及与赤藓糖醇、甘露醇、山梨醇、麦芽糖醇、异麦芽糖醇、乳糖醇等其他糖醇及蔗糖的比较。图 1-2 所示为木糖醇与其他糖醇及葡萄糖、蔗糖和果糖的熔点比较。木糖醇的熔程 $92\sim 96^\circ\text{C}$, 相对密度

1.5, 极易溶于水, 每毫升水可溶解 1.6g, 微溶于乙醇和甲醇。图 1-3 所示为不同温度下木糖醇与其他糖醇及蔗糖在水中的溶解度比较。

表 1-1 木糖醇的主要物化性质及与其他糖醇及蔗糖的比较

项 目	木糖醇	赤藓糖醇	甘露醇	山梨醇	麦芽糖醇	异麦芽糖醇	乳糖醇	蔗糖
碳原子数	5	4	6	6	12	12	12	12
相对分子质量	152	122	182	182	344	344	344	342
熔点/°C	94	121	165	97	150	145~150	122	190
玻璃化转变温度/°C	-22	-42	-39	-5	47	34	33	52
溶解热/(kcal/kg) ^①	-36.5	-43	-28.5	-26	-18.9	-9.4	-13.9	-4.3
热稳定性/°C	>160	>160	>160	>160	>160	>160	>160	>150
酸稳定性(pH)	2~10	2~10	2~10	2~10	2~10	2~10	>3	水解
溶解度(20°C)/%	63	37	18	75	62	28	55	66
吸湿性	高	中	较低	高	高	很低	中	低

① 1kcal=4.18kJ。

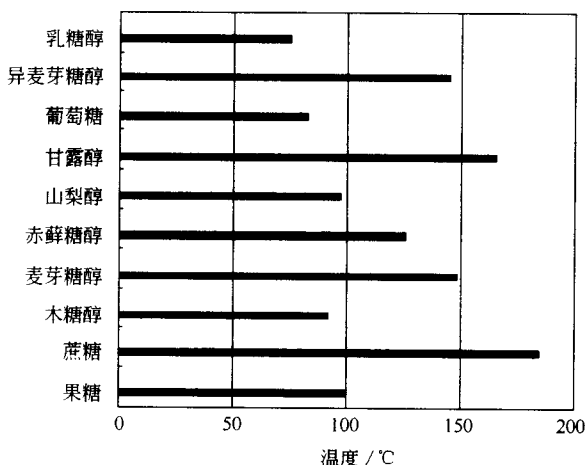


图 1-2 木糖醇与其他糖醇及葡萄糖、蔗糖和果糖的熔点比较

表 1-2 所列为木糖醇在不同温度下的相对湿度和吸湿性。表 1-3 所列为不同浓度的木糖醇水溶液在不同温度下的黏度。图 1-4 所示为用布氏黏度计在不同温度下测得的木糖醇及其他糖醇的黏度。

表 1-2 木糖醇在不同温度下的相对湿度和吸湿性

温度/°C	相对湿度/%	水分吸收量/%		
		1d	2d	6d
23	76	0.4	0.118	0.308
	86	3.8	7.64	25.20
	92	21.7	37.7	92.34
37	45	0.048	储藏 4d	
	55	0.054		
	63	0.054		

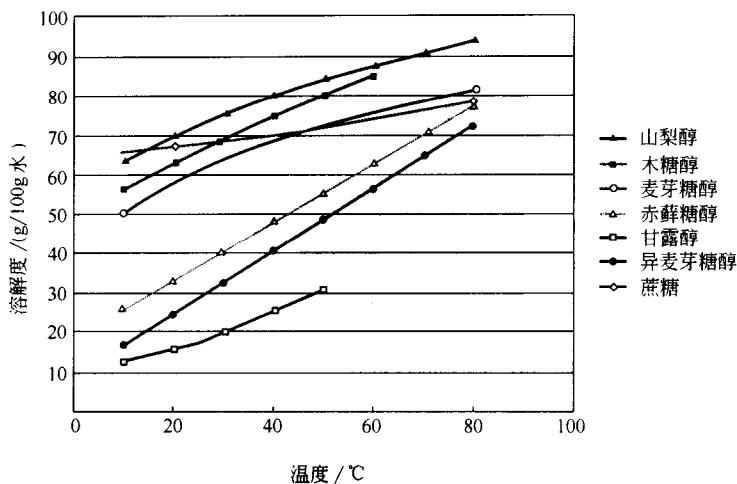


图 1-3 不同温度下木糖醇与其他糖醇及蔗糖在水中的溶解度比较

表 1-3 不同浓度木糖醇水溶液在不同温度下的黏度 单位: $\text{mPa} \cdot \text{s}$

质量分数/%	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
10	1.225	0.969	0.819	0.638	0.562	0.508	0.426	0.388
15	1.491	1.133	0.934	0.761	0.653	0.550	0.480	0.426
20	1.798	1.376	1.112	0.874	0.782	0.621	0.535	0.470
25	2.180	1.656	1.332	1.060	0.843	0.717	0.613	0.537
30	2.714	2.103	1.574	1.245	1.003	0.840	0.704	0.610
35	3.529	2.516	1.915	1.497	1.214	1.032	0.844	0.709

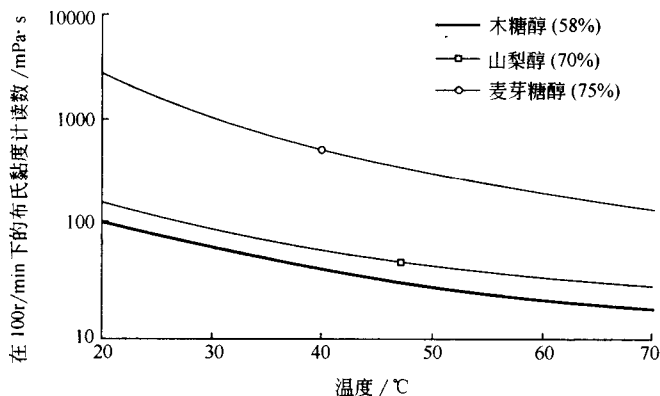


图 1-4 不同温度下木糖醇与其他糖醇的黏度比较

木糖醇的甜度与蔗糖接近, 图 1-5 所示为在 25°C, pH=6 时 10% 木糖醇及其他糖醇的水溶液与 10% 蔗糖水溶液, 的甜度比较, 其中以蔗糖为基准 (100)。

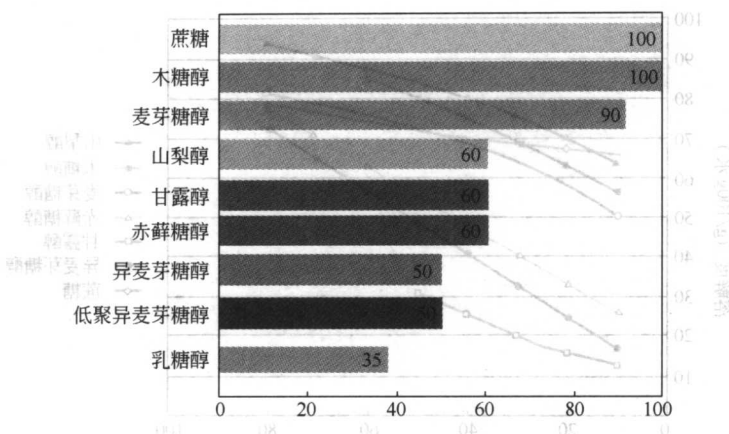


图 1-5 10%木糖醇及其他糖醇水溶液与10%蔗糖水溶液的甜度比较 (25℃, pH=6)

图 1-6 所示为木糖醇与其他糖醇及蔗糖在水中的溶解热比较。将 50g 木糖醇溶于 100g 水中的水温变化曲线及与其他糖醇、蔗糖的比较如图 1-7 所示。

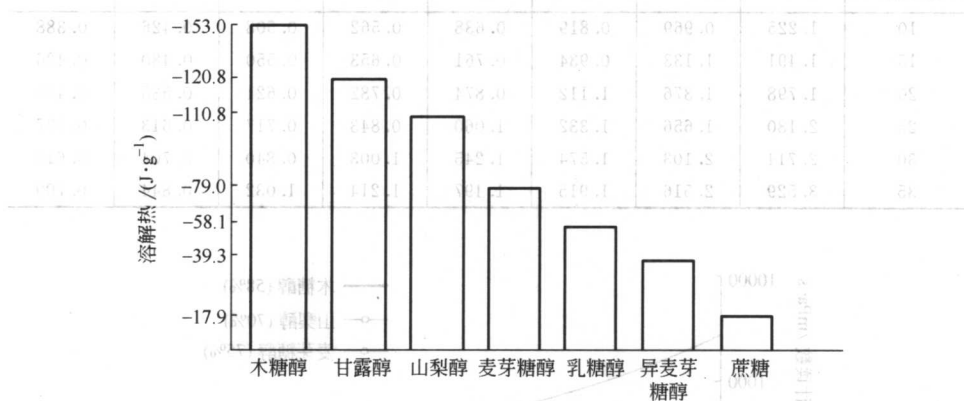


图 1-6 木糖醇与其他糖醇及蔗糖在水中的溶解热比较

由图 1-6、图 1-7 可见，木糖醇溶于水会吸热，其吸热值在糖醇类甜味剂中最大，因此食用时会产生凉爽的感觉。

木糖醇的热稳定性很好，10%木糖醇水溶液的 pH 为 5.0~7.0，不与可溶性氨基化合物发生美拉德反应。关于木糖醇的能量值，目前的争议还很大，不同国家和组织认可的具体数值也不同。美国和日本认为是 11.7kJ/g，欧盟认为是 10kJ/g。表 1-4 所列为不同国家及组织测定的木糖醇和其他糖醇的能量值。

表 1-5 所示为木糖醇与蔗糖的部分物化性质比较。

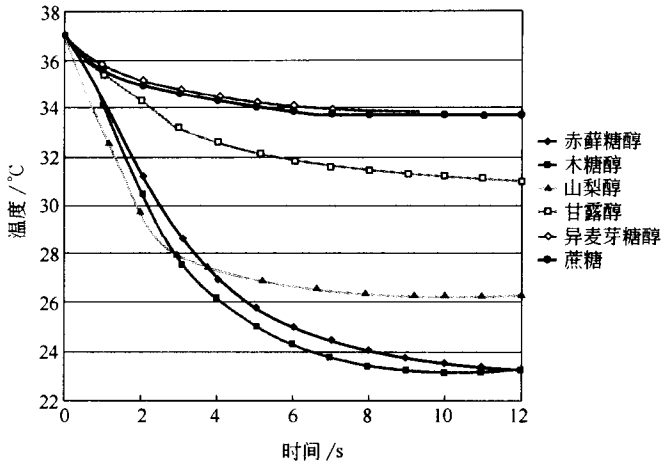


图 1-7 将 50g 木糖醇溶解于 100g 水中的水温变化曲线及与其他糖醇、蔗糖的比较

表 1-4 木糖醇和其他糖醇的能量值对比 单位: kJ/g

国 家	木糖醇	山梨醇	甘露醇	麦芽糖醇	异麦芽糖醇	赤藓糖醇
美国	10.032	10.868	6.688	12.54	8.36	0.836
日本	12.54	12.54	8.36	8.36	8.36	0.0
加拿大	12.54	10.868	6.688	12.54	8.36	—
澳大利亚和新西兰	13.794	13.794	8.778	15.884	12.122	0.836
欧盟	10.032	10.032	10.032	10.032	10.032	—

表 1-5 木糖醇与蔗糖的部分物化性质比较

物化性质	木糖醇	蔗糖	物化性质	木糖醇	蔗糖
熔点/°C	93~94.5	179~186	溶解热(吸热)/(J·g ⁻¹)	153.0	18.1
沸点(0.1MPa)/°C	216	分解	旋光度(α _D ²⁰)	—	+66.5°
密度(堆积密度,15°C)/(g·cm ⁻³)	1.50	1.59	黏度(20°C)/(MPa·s)		
能量值/(kJ·g ⁻¹)	11.7~12.1	16.7	浓度 10%	1.23	1.31
可发酵性	—	+	浓度 20%	1.67	2.03
焦糖化,褐变	—	+	浓度 40%	4.18	6.17
水分吸收(4d,20~22°C)/%			浓度 60%	20.63	28.50
60%相对湿度	0.05	0.02	折射率(25°C)		
92%相对湿度	90	4	浓度 10%	1.3471	1.3475
水溶液相对密度(20°C/4°C)			浓度 20%	1.3620	1.3634
浓度 10%	1.03	1.04	浓度 30%	1.3779	1.3806
浓度 20%	1.07	1.08	浓度 40%	1.3951	1.3991
浓度 40%	1.15	1.18	浓度 50%	1.4132	1.4194
浓度 60%	1.23	1.29			

二、木糖醇的代谢

木糖醇在体内的吸收是通过两条不同的代谢途径实现的，这两条途径是：

- ① 哺乳动物体内直接代谢已吸收的木糖醇，代谢主要在肝脏中进行；
- ② 肠道微生物通过发酵降解作用间接代谢木糖醇。

(一) 间接代谢途径

包括木糖醇在内的所有多元醇在消化道内的吸收速度较慢，这是因为消化道内没有专门运输这类物质的载体。因此，摄取大量的这类化合物后，其中一部分将到达肠的末端并通过肠道微生物进行部分或全部发酵作用。微生物代谢的终产物主要是短链挥发性脂肪酸，可通过肠壁吸收进入代谢途径。乙酸和丁酸在肝脏中进行有效的代谢并在线粒体作用下合成乙酰辅酶 A。几乎全部丙酸被肝脏利用，合成丙酰辅酶 A。

代谢中会产生一些挥发性脂肪酸，这是正常现象。特别是利用多糖（淀粉、纤维素、半纤维素、果胶等）和某些糖（如乳糖）代谢时更是如此，因为小肠中缺乏水解这些物质的酶或其活性很差。对难消化的碳水化合物，这条发酵代谢途径起着重要作用。

(二) 通过葡萄糖醛酸-戊糖磷酸酯支路的直接代谢途径

除了间接代谢途径外，部分从胃肠吸收而又没发生任何变化的木糖醇可进入直接代谢途径。

图 1-8 所示为木糖醇的代谢过程及它经戊糖磷酸酯支路时与碳水化合物代谢的整体关系。从中可看出木糖醇转变成木酮糖的经过及其与葡萄糖醛酸路线（此路线对应于葡萄糖醛酸与肌醇的破裂及抗坏血酸的合成）和与戊糖磷酸循环的整体联系情况。戊糖磷酸循环为脂肪的合成提供了还原型对应物（三磷酸吡啶核苷

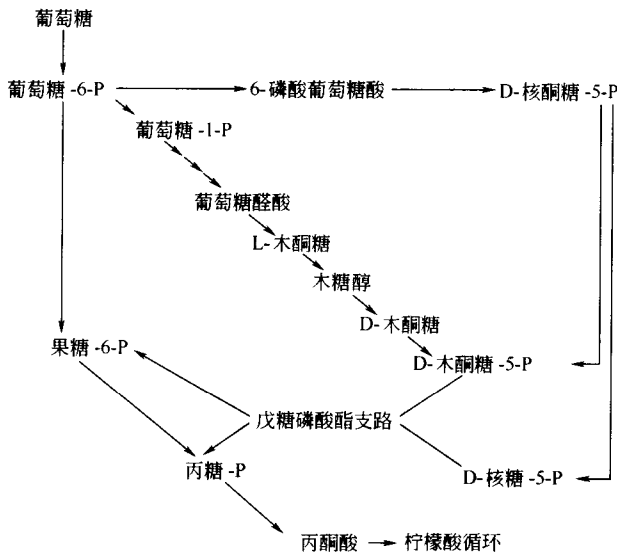


图 1-8 葡萄糖醛酸-戊糖磷酸酯支路的代谢途径

酸 NADPH₂), 为核苷酸合成提供脱氢核糖, 为嘌呤的生物合成提供核糖-5-磷酸 (核糖-5-P)。这样, 木糖醇通过戊糖磷酸路线代谢至 6-磷酸-果糖 (果糖-6-P), 再经糖酵解途径降解或转化成糖原的母体——1-磷酸-葡萄糖 (葡萄糖-1-P)。

通过观察遗传病人, 特别是糖尿病人, 可知木糖醇是人体正常的内源性代谢产物, 这些人的尿中含有大量的木酮糖。当 L-木酮糖潜伏在机体组织中可被专一的 NADPH₂ 酶还原成木糖醇。这种酶在含戊糖的尿中会丧失活力。因为戊糖糖尿病患者每天排出 L-木酮糖约 2~15g, 据估计木糖醇日生成量与此数值相等。

三、木糖醇的生理功效

木糖醇在体内代谢不需要胰岛素参与, 不会引起血糖水平波动, 可供糖尿病人食用。木糖醇不能被大多数口腔微生物所发酵, 能防龋齿, 还可作为非肠道营养的能量来源。

(一) 不会引起血糖水平波动

在历史上, 木糖醇的最初用途就是代替蔗糖用于糖尿病患者食品。糖尿病是一种慢性代谢障碍疾病, 它的特点是血糖水平升高快和 (或) 血浆中葡萄糖水平大于葡萄糖耐量试验规定的极限。它或者是由于胰岛素完全缺乏引起的 (胰岛素型糖尿病), 或者是由于胰岛素受阻引起的 (非胰岛素型糖尿病)。后者胰岛素分泌正常甚至超出血浆胰岛素水平, 但组织对它的敏感性较低。

对糖尿病患者来说, 最终目的是要稳定血液中葡萄糖水平以使糖代谢正常, 因此必须限制蔗糖的摄入。有一项研究让糖尿病人分别摄入 50g 葡萄糖、50g 木糖醇以观察血液葡萄糖值的变化情况。分析表明, 摄入木糖醇后血液葡萄糖值提高很少, 这证实了理论上预测会出现的木糖醇转化成葡萄糖的过程实际上进行得很慢, 还不足以引起血糖值的上升。另一项研究是让胰岛素型糖尿病人分别摄取含 30g 蔗糖、30g 木糖醇或 30g 淀粉的早餐后, 测定各自所需的胰岛素数量。观察表明, 摄入蔗糖所需的胰岛素数量明显比摄入淀粉或木糖醇所需的胰岛素多。

综合这些试验及一些耐受性试验, 结果认为糖尿病人食用木糖醇是安全的, 它不会引起不良的代谢效果。

(二) 可作为非肠道营养的能量来源

简单地说, 非肠道营养就是一种流动的能量、营养和电解质平衡溶液, 它能提供能量 (葡萄糖和类脂之类)、氨基酸和无机盐等。在直接外伤或手术后的恢复阶段, 身体对能量的需求量大增, 因此必须供给病人足够的能量。但由于手术前的震惊与能量消耗导致了组织器官储备能量 (肝糖原) 已局部耗尽, 又因外伤可能严重干扰了人各方面的代谢机能, 因此此时重病人通常不易重新建立起稳定的代谢体系。最显著的变化就是对葡萄糖的利用程度减弱了。触电、损伤、手术后、烧伤、脓毒和糖尿病等病人的情况更是如此。这是因为病人体内的内分泌平衡系统被破坏了, 病人葡萄糖代谢作用减弱了, 但此时身体对能量的需求却又增

加不少。在这样的情况下，非肠道注入葡萄糖液（通常还含有氨基酸、必需的脂肪酸及无机盐等）也不能立即重新建立起平衡的代谢体系。有时随着葡萄糖液的大量注入，而此时人体对葡萄糖的利用程度减弱，病人反而会出现昏迷、渗透性多尿、脱水和浮肿等不良现象。在这种情况下，除了葡萄糖外，人们提出了可注射木糖醇和果糖。据分析，木糖醇具有改善代谢的作用。

虽然大量的研究表明非肠道木糖醇不会引起不良效果，但有些人仍然持怀疑态度，他们认为用木糖醇代替葡萄糖可能引起血清中乳酸、尿酸和胆汁红素浓度的增加，还可引起草酸钙晶体沉淀于肾中。有些问题有待于进一步探讨。

（三）抗龋齿特性

日常食物中不可能完全排除可发酵性糖类。有研究发现，日常正餐中采食含蔗糖食物并不会或很少会引起牙齿龋变，但正餐之间食用蔗糖的频繁程度与牙齿龋变关系却十分密切。各主餐之间若经常食用含蔗糖的点心、小吃，会使牙斑的pH下降并长时间地保持在临界值pH5.7以下。结果，牙齿的脱矿时间超过了修补时间，继之出现了龋齿。这就说明若用非发酵性糖对防牙齿龋变会产生很大的影响。虽然这种蔗糖替代品只用在主餐外的点心和饮料中。

大量实验证明木糖醇不能被大多数口腔微生物所发酵，牙齿与木糖醇接触不会引起牙斑pH的下降。将木糖醇与牙斑持续接触两年，也没发现牙斑微生物对木糖醇的发酵能力有何影响。

通常使用小鼠来进行牙齿龋变试验，因为这种动物刚长出的白牙能在数周之内发生龋变，易于人们进行试验和辨认。绝大多数的生物试验均表明木糖醇没有致龋齿性，摄入含木糖醇制品的动物发生牙齿龋变的程度甚至比摄入淀粉制品的还要少。但有个试验报道了动物摄取了木糖醇-蔗糖混合物或在含蔗糖的主餐之间间断地摄入木糖醇，发现某种程度上有龋齿现象出现。有人通过试验表明木糖醇不会引起类似蔗糖诱发的龋齿，并由此提出假设认为这种多羟基化合物有抗龋齿活性。不过，对此假设仍有争议。

用木糖醇代替膳食中几乎全部的蔗糖维持两年发现龋齿现象显著减少，用口香糖做试验得到几乎相同的结论。在糖果中用木糖醇代替一半蔗糖，达到每天摄入30g木糖醇的标准，发现龋齿减少了70%左右。匈牙利曾对在校儿童进行了长达3年的大规模试验。试验中，用木糖醇代替部分蔗糖，观察它对龋齿的预防效果，并与内服氟化物及通常治疗相比较。试验发现木糖醇处理组的龋齿现象明显减少，减少程度比氟化物处理组和控制组的大。因此，可以认为木糖醇具有抗龋齿效果。

变异链球菌（*Streptococcus mutans*）的致龋齿活性特别大，这种微生物紧紧依附在齿冠上，利用细胞外葡萄糖生长和代谢，在酸性环境中（pH5）活性大，能在齿槽和裂缝深处的微氧或厌氧条件下生长。*S. mutans*在牙斑上优先生长的原因在于酸性条件下它仍保持较强的代谢活力，它在pH5环境中的活力比在pH7中的更大，而其他微生物在酸性环境中均无代谢活力。这表明频繁食用

蔗糖会使 *S. mutans* 比其他牙斑微生物更易生长。

在这方面，用木糖醇代替蔗糖来预防和控制龋齿的出现成了一种很吸引人的方法。这有两个原因。首先，木糖醇不会产酸。事实上，摄取含木糖醇的口香糖后，牙斑 pH 不但没有下降反而有所上升。这时 *S. mutans* 活性不大，其他微生物可竞争得过它。第二，除了通过 pH 变化间接影响 *S. mutans* 外，木糖醇还直接抑制它的生长。这种抑制作用似乎与细胞内 5-磷酸-木糖醇的积累有关，它对细菌有毒。

四、木糖醇的安全毒理学分析

木糖醇得到 FDA（美国食品及药物管理局）认可，能安全用于食品，对其 ADI（每日允许摄入量）值不作特殊规定 [FAO/WHO（世界卫生组织），2001]。其小鼠经口 LD₅₀ 为 22g/kg。

在健康的和患有糖尿病的自愿受试者身上进行的耐药力研究表明，即使口服极高剂量的木糖醇（200g/d），人体对它的耐药力也很好，没有观察到任何不良变化。不过，机体对木糖醇的吸收较慢，有时出现暂时性轻泄和肠胃不适现象，假若一次性摄入过多，会引起肠胃不适或腹泻，其原因在于肠胃对它的吸收速度慢，从而引起渗透压不平衡而造成的。因此必须控制每天的食用量。停止或减少摄入，这些现象即可消失。持续摄取木糖醇，人体的耐药力会上升。根据各国试验，确定每天的食用量为 1g/(kg 体重·d)。正常人初次食用量为 30g/d，当消化系统适应后，最大允许食用量为 200~300g/d。对于糖尿病患者，一般认为每天的安全食用水平控制在 90g。我国对糖尿病患者进行了 2 年的临床试验，规定成人每天的最大食用量为 50g。

动物急性毒性试验表明，不管木糖醇的采食方法如何，其毒性都是很低的。常规的胚毒、致畸试验和对繁殖力的影响试验均表明木糖醇无毒。对木糖醇长期食用的安全性问题也进行了研究，试验动物是大鼠、小鼠和狗，为期 2 年。试验中，木糖醇是以最大剂量（占膳食 20%）摄入的。绝大多数试验证明木糖醇是安全的，但有些情况尚需进一步观察，即小鼠出现的尿道结石和雄大鼠出现的肾上腺髓状肿瘤发生率稍有提高等问题。后来的研究及用其他多元醇和乳糖的试验表明，小鼠和大鼠出现的这些不良作用本质上是属于一个类型的。由于基本作用过程的种属特异性，用此来评价人体食用安全性意义不大。

（郑建仙、耿立萍）

第二节 木糖醇的生产技术

木糖醇的生产方法可分成三种，分离提取、化学合成、生物合成，如图 1-9