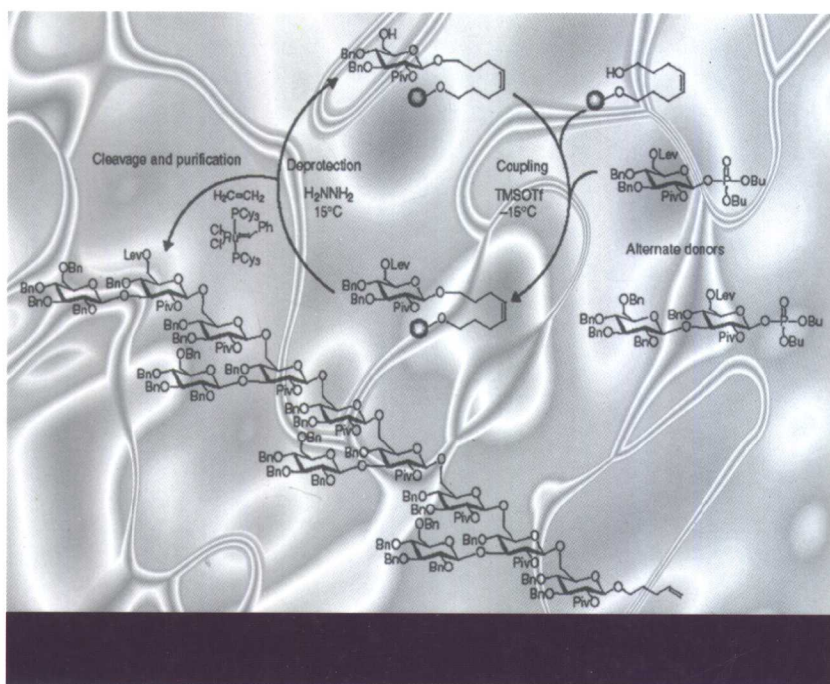


郑建仙 主编

功能性低聚糖



Chemical Industry Press

 化学工业出版社

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

功能性低聚糖/郑建仙主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 2

ISBN 7-5025-5210-3

I. 功… II. 郑… III. 食糖-疗效食品-基本知识 IV. TS24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 010928 号

功能性低聚糖

Functional Oligosaccharides

郑建仙 主编

责任编辑: 刘俊之

文字编辑: 周 侗

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(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

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 字数 710 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5210-3/TS·157

定 价: 68.00 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

京朝工商广临字 (2004) 年第 007 号

利用生物技术

开发功能性食品

袁隆平

2003.2.27.

前 言

功能性低聚糖，因具有滋生双歧杆菌的功效，近些年来备受关注，发展迅速。人们寄希望于功能性低聚糖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。

这是一个令人振奋的高新技术领域，有着广阔的发展空间和巨大的市场潜力。生物技术在功能性低聚糖生产方面的应用有了长足的发展，它将有力推动食品工业和食品配料工业发生革命性的变化。为系统总结本领域的最新科技成果，主编邀请了 15 位科技工作者加盟，经过 2 年多的努力，共同编撰了这部《功能性低聚糖》。

由于本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，是他们的奉献琢开了本书的理论源泉，是他们的科研成果构筑了本书的整体框架。全书由郑建仙主编，朱海霞协助。

本书的著成，得到了中国食品添加剂生产应用工业协会、中国饮料工业协会、中国食品工业协会、中国焙烤糖制品工业协会、广州市海圣生物科技有限公司（原华南理工大学精细化工厂）的热情支持，得到了化学工业出版社的鼎力支持，在此表示衷心的感谢！对参加编著的各位作者，表示由衷的感谢！不妥之处，敬请来电 020-87112278，或 E-mail: fejxzhen@scut.edu.cn 批评指正。

主编：郑建仙

2003 年 12 月

于华南理工大学

目 录

第一章 绪论	1	四、高浓度低聚果糖浆的生产技术	51
一、有毒发酵产物的毒害性	1	第四节 低聚果糖的分析和应用技术	52
二、功能性低聚糖的生理功效	2	一、分析方法	53
三、功能性低聚糖的有效剂量	5	二、应用范例	53
四、双歧杆菌的特性和作用	5	主要参考文献	55
五、功能性低聚糖的生产技术	6	第四章 菊粉及其降解物	57
第二章 低聚异麦芽糖	7	第一节 物化性质和生理功效	58
第一节 物化性质和生理功效	7	一、物化性质	58
一、物化性质	7	二、生理功效	60
二、生理功效	9	第二节 菊粉酶的酶学性质和生产技术	70
第二节 α -葡萄糖苷酶的酶学性质和生产		一、酶学性质	70
技术	14	二、生产技术	71
一、酶学性质	15	第三节 菊粉的来源和生产技术	75
二、生产技术	15	一、来源	75
第三节 低聚异麦芽糖的酶法生产技术	17	二、生产技术	78
一、酶法生产工艺	17	第四节 以菊粉为原料生产低聚果糖	88
二、利用新普鲁蓝酶生产	20	一、酶法生产低聚果糖	88
第四节 oligodextrans 的酶法生产技术	23	二、利用双酶反应体系生产低聚果糖	94
一、oligodextrans 的连续化生产技术	23	第五节 菊粉及其降解物的分析和应用	
二、利用酶膜反应器生产 oligodextrans 的		技术	97
工艺优化	23	一、分析方法	97
第五节 低聚异麦芽糖的分析和应用技术	28	二、应用范例	98
一、分析方法	29	主要参考文献	102
二、应用范例	30	第五章 低聚半乳糖	104
主要参考文献	35	第一节 物化性质和生理功效	104
第三章 低聚果糖	37	一、物化性质	104
第一节 低聚果糖的物化性质和生理功效	37	二、对肠道菌群的调节作用	105
一、物化性质	38	三、对肠道功能的调节作用	107
二、生理功效	39	第二节 β -半乳糖苷酶的酶学性质和生产	
第二节 β -呋喃果糖苷酶的酶学性质和生产		技术	110
技术	42	一、酶学性质	110
一、酶学性质	42	二、生产技术	112
二、生产技术	43	第三节 低聚半乳糖的酶法生产技术	112
第三节 低聚果糖的酶法生产技术	45	一、酶法生产工艺	112
一、生产技术简况及酶法生产原理	45	二、利用水相体系酶法生产	113
二、酶法生产工艺	47	三、利用双相体系酶法生产	116
三、利用固定化 <i>Aspergillus japonicus</i>		四、利用固定化酶生产	116
生产	49	第四节 利用耐热型 β -半乳糖苷酶生产低聚	

半乳糖	117	第五节 偶合糖的分析和应用技术	174
一、利用硫矿硫化叶菌酶法生产	117	一、分析方法	174
二、利用单形青霉菌酶法生产	122	二、应用范例	175
第五节 利用 β -半乳糖苷酶合成低聚半乳		主要参考文献	176
糖的工艺优化	125	第八章 低聚木糖	178
一、生物合成的动力学模型	125	第一节 物化性质和生理功效	178
二、温度对生物合成的影响	127	一、物化性质	178
三、酶源对生物合成的影响	129	二、生理功效	179
第六节 低聚半乳糖的分析和应用技术	134	第二节 木聚糖酶的酶学性质和生产	
一、分析方法	134	技术	184
二、应用范例	135	一、酶学性质	184
主要参考文献	137	二、生产技术	185
第六章 低聚果乳糖	138	第三节 低聚木糖的生产技术	190
第一节 物化性质和生理功效	138	一、生产工艺	190
一、物化性质	138	二、分离和精制技术	190
二、生理功效	141	第四节 低聚木糖的化学-酶联合法生产	
第二节 酶法生产技术	144	技术	193
一、酶法生产工艺	144	一、原料木聚糖的组成和结构	193
二、利用模拟流化床反应器酶法生产	145	二、木聚糖的化学法生产工艺	195
第三节 酶法生产的动力学模型	147	三、低聚木糖的酶法生产工艺	198
一、反应模型	148	第五节 以纸浆为原料酶法生产低聚	
二、水解模型	151	木糖	202
三、转糖基反应模型	152	一、纸浆的制备及其酶水解工艺	202
四、反应模型的有效性	154	二、分离和精制技术	202
第四节 分析和应用技术	155	第六节 低聚木糖的化学法生产技术	205
一、分析方法	155	一、自水解法生产工艺	205
二、应用范例	156	二、酸水解法生产工艺	207
主要参考文献	158	三、 β (1 $\rightarrow$ 3) 低聚木糖的化学合成	
第七章 偶合糖	159	技术	208
第一节 物化性质和生理功效	159	第七节 低聚木糖的分析和应用技术	209
一、物化性质	159	一、分析方法	210
二、生理功效	161	二、应用范例	210
第二节 环糊精葡萄糖基转移酶的酶学性		主要参考文献	213
质和生产技术	162	第九章 低聚壳聚糖	215
一、酶学性质	162	第一节 物化性质和生理功效	216
二、生产技术	162	一、物化性质	216
第三节 果聚糖蔗糖酶的酶学性质和生产		二、增强免疫功效	218
技术	165	三、抗感染功效	220
一、酶学性质	165	四、抗肿瘤功效	224
二、生产技术	168	五、降血糖功效	227
第四节 偶合糖的酶法生产技术	171	六、抗菌抑菌功效	228
一、利用环糊精葡萄糖基转移酶生产	171	七、诱导植物细胞产生植物抗毒素	232
二、利用果聚糖蔗糖酶生产	172	第二节 壳聚糖酶和甲壳素酶的酶学性质和	
三、偶合糖的分离和结晶技术	172	生产技术	234

一、壳聚糖酶	235	一、物化性质	291
二、甲壳素酶	236	二、生理功效	292
第三节 低聚壳聚糖的酶水解法生产		第二节 棉子糖的生产技术	295
技术	237	一、从天然植物中提取	295
一、酶水解生产低聚壳聚糖的影响		二、棉子糖合成酶的酶学性质和生产	
因素	237	技术	297
二、利用膜技术连续化生产	239	三、棉子糖的酶法合成技术	301
三、利用溶菌酶生产	241	第三节 棉子糖的分析和应用技术	302
四、利用非专一性水解酶生产	244	一、分析方法	302
五、低聚壳聚糖的分离和结晶技术	249	二、应用范例	304
第四节 低聚壳聚糖的酶合成法生产		主要参考文献	305
技术	251	第十二章 大豆低聚糖	306
一、甲壳二糖的酶法合成工艺	251	第一节 物化性质和生理功效	306
二、利用甲壳素酶生物合成低聚壳		一、分布	306
聚糖	252	二、物化性质	307
三、利用溶菌酶生物合成低聚壳聚糖	253	三、生理功效	309
四、利用酶法精制低聚壳聚糖粗溶液	255	第二节 大豆低聚糖的生产技术	313
第五节 低聚壳聚糖的基因工程法生产		一、从大豆乳清中分离	313
技术	257	二、从羽扇豆提取液中分离	315
一、利用重组大肠杆菌生产	257	三、从豆腐黄浆水中分离	316
二、利用基因工程法生产低聚壳聚糖衍		四、酶法改性	316
生物	261	第三节 大豆低聚糖的分析和应用技术	317
第六节 低聚壳聚糖的化学降解法生产		一、分析方法	317
技术	266	二、应用范例	325
一、酸降解法生产技术	266	主要参考文献	328
二、低聚壳聚糖的氧化降解法生产		第十三章 乳酮糖	329
技术	269	第一节 物化性质和生理功效	329
第七节 低聚壳聚糖的分析和应用技术	272	一、物化性质	329
一、分析方法	272	二、生理功效	330
二、应用范例	273	第二节 乳酮糖的生产技术	331
主要参考文献	278	一、乳糖的生产工艺	331
第十章 低聚龙胆糖	280	二、乳酮糖的生产工艺	332
第一节 物化性质和生理功效	280	三、利用碱单一催化法生产乳酮糖	332
一、物化性质	280	四、利用碱和硼酸协同催化法生产乳	
二、生理功效	281	酮糖	334
第二节 低聚龙胆糖合成酶的酶学性质和		五、利用铝酸盐催化法生产乳酮糖	338
生产技术	283	六、乳酮糖的分离和精制工艺	339
第三节 低聚龙胆糖的酶法生产技术	287	第三节 乳酮糖的分析和应用技术	342
第四节 低聚龙胆糖的分析和应用技术	288	一、分析方法	343
一、分析方法	288	二、应用范例	346
二、应用范例	289	主要参考文献	347
主要参考文献	290	第十四章 异麦芽酮糖	349
第十一章 棉子糖	291	第一节 物化性质和生理功效	349
第一节 物化性质和生理功效	291	一、物化性质	349

二、代谢特性	350
三、抗龋齿特性	351
第二节 酶法生产技术	354
一、以蔗糖为原料酶法生产	355
二、以葡萄糖和果糖为原料酶法生产	360
第三节 基因工程法生产技术	360
一、利用转基因烟草生产	361
二、利用转基因马铃薯块茎生产	363
第四节 分析和应用技术	365
一、分析方法	366
二、应用范例	367
主要参考文献	369
第十五章 塔格糖	370
第一节 物化性质和生理功效	370
一、分布	370
二、物化性质	370
三、代谢特性	372
四、生理功效	373
第二节 生产技术	379
一、酶法合成工艺	379
二、利用半乳糖醇生物合成	382
三、化学合成工艺	383
第三节 分析和应用技术	385
一、分析方法	386
二、应用范例	386
主要参考文献	390
第十六章 其他低聚糖及其生物合成	392
第一节 其他低聚糖	392
一、水苏糖	392
二、低聚异麦芽酮糖	394
三、低聚纤维糖	395
四、低聚甘露糖	395
第二节 利用 α -淀粉酶生物合成低聚糖	396
一、酶法合成原理	396
二、 α -淀粉酶生物合成	396
第三节 利用 α -葡萄糖苷酶生物合成低聚糖	399
一、利用 α -葡萄糖苷酶生物合成异型低	

聚糖	400
二、改性 α -葡萄糖苷酶对其合成低聚糖的影响	402
第四节 利用 β -甘露糖转移酶生物合成 N -低聚三糖	409
一、植烷基底物受体 (PPGn2) 的化学合成	409
二、 β -甘露糖转移酶的结构表达和固定化	410
三、 β -甘露糖基三糖的制备技术	411
第五节 利用聚合物载体生物合成低聚糖	413
一、利用聚合物载体化学合成低聚糖	413
二、利用聚合物载体酶法合成低聚糖	413
三、利用聚合物载体酶法和化学法合成低聚糖的比较	415
第六节 新型糖苷合成酶的筛选	416
一、新型糖苷合成酶的筛选目的	416
二、新型糖苷合成酶的筛选方法	417
主要参考文献	421
第十七章 低聚糖的合成技术	424
第一节 糖苷键的化学合成技术	424
一、糖基化的化学方法	424
二、糖基化过程中的异构控制	425
第二节 低聚糖的化学合成技术	427
一、低聚糖的收敛分段合成法	427
二、低聚糖的选择性糖基化和一锅多步糖基化合成法	429
三、低聚糖的固相合成法	430
四、低聚糖固相合成中的“加载-释放-再加载”技术	432
五、低聚糖的自动合成法	434
第三节 低聚糖的化学-酶联合合成技术	436
一、低聚糖的酶促糖基化合成法	436
二、低聚糖的化学-酶联合合成法	437
三、结构复杂的 N -多糖和 N -低聚糖的合成技术	439
主要参考文献	442

第一章 绪 论

低聚糖 (oligosaccharide), 或称寡糖, 是由 3~9 个单糖经糖苷键连接而成的低度聚合糖。由于人体肠胃道内没有水解这些低聚糖的酶系统, 因此它们不被消化吸收而直接进入大肠内, 优先被双歧杆菌所利用, 是双歧杆菌的有效增殖因子。由于具有该独特的生理功效, 故称为功能性低聚糖, 通常包括低聚异麦芽糖、低聚果糖、低聚半乳糖、低聚乳果糖、偶合糖、低聚木糖、低聚壳聚糖、低聚龙胆糖、棉子糖、水苏糖等。除了低聚龙胆糖有苦味外, 其余的都带有程度不一的甜味。

菊粉属于多糖化合物, 乳酮糖、异麦芽酮糖、塔格糖属于单双糖, 这 4 种化合物因具有相似的生理功效, 故放在本书一并讨论。

功能性低聚糖能促进人体肠道内固有的有益细菌——双歧杆菌的增殖, 从而抑制肠道内腐败菌的生长, 并减少有毒发酵产物的形成。双歧杆菌发酵低聚糖产生大量的短链脂肪酸, 能刺激肠道蠕动、增加粪便湿润度并保持一定的渗透压, 从而防止便秘的发生。龋齿是由于口腔微生物, 特别是突变链球菌 (*Streptococcus mutans*) 侵蚀而引起的, 功能性低聚糖不是这些口腔微生物的合适作用底物, 不会引起牙齿龋变。由于双歧杆菌对氧、光、热和酸的高度敏感性, 要想直接将它添加入食品中相当困难。

一、有毒发酵产物的毒害性

食物经消化吸收后所剩残余物到达结肠后, 在发酵过程中会形成许多有毒代谢产物, 给人体健康带来很多不利影响。

(一) 有毒发酵产物的种类和数量

在人体结肠内形成的有毒发酵产物包括: 氨 (肝毒素)、胺 (肝毒素)、亚硝胺 (致癌物)、苯酚与甲苯酚 (促癌物)、吲哚与 3-甲基吲哚 (致癌物)、雌性激素 (被怀疑为致癌物或乳腺癌促进物)、次级胆汁酸 (致癌物或结肠癌促进物)、糖苷配基 (诱变剂) 等。

肠道排泄物 (粪便) 中约有 50% 为细菌团聚物, 所以在肠道中因发酵作用而产生有毒代谢产物的数量不容忽视。如表 1-1 所示为 100 g 湿粪便所包含的有毒代谢产物。据估计, 体重 70kg 的成人体内每天以 0.067~0.67 mg 的速率产生 N-二甲基亚硝胺, 此数据是小鼠最低致癌剂量的 10~1000 倍。

表 1-1 100 g 湿粪便所包含的有毒代谢产物

品 种	氨	苯酚	甲苯酚	吲哚	3-甲基吲哚
数量/mg	395	0.5	4.1	2.8	1.1

已知参与生成这些有毒代谢产物的细菌包括: 大肠杆菌与梭状芽孢杆菌 (代谢产物为氨、胺、亚硝胺、苯酚、吲哚、糖苷配基和次级胆汁酸), 拟杆菌和粪链球菌 (代谢产物为亚硝胺、糖苷配基和次级胆汁酸), 变形杆菌 (代谢产物为氨、胺和吲哚) 等。

(二) 参与形成有毒发酵产物的酶

有毒发酵是由有害细菌中的酶产生的, 酶的产生又依赖于这些细菌及胃肠生态学。这些酶包括 β -多糖苷酶、 β -多糖苷酸酶、硝基还原酶、偶氮还原酶和甾醇-7- α -脱氢木聚糖酶和

azoreductase。梭状芽孢杆菌中的 azoreductase 及 β -葡萄糖苷酸酶的活性最高，在拟杆菌、真细菌和消化链球菌中其活性较低，在双歧杆菌中则几乎没有活性。

（三）有毒发酵产物对人体健康的危害

1. 引起癌变

高脂肪膳食刺激分泌大量的胆汁酸，继而产生过量的次级胆汁酸及类固醇（甾族化合物），这与结肠癌的高发病率关系很大。大量摄入肉类食物会造成有害微生物酶及其有毒代谢产物的增加，如西方膳食方式易造成体内亚硝胺的大量产生与积累，这被认为与结肠癌高发病率有一定的关系。

与结肠癌相似，乳腺癌的发生也与高脂肪或高肉食的膳食习惯有关。某些肠道微生物会将大量分泌的胆汁酸转变成过量的雌性激素，这仅是一个潜在的对雌性激素起作用的显著因素，被认为是引起乳腺癌高发病率的原因之一。

2. 引起衰老及成人病

随着年龄的增大，由于胃肠液分泌量减少，肠道内双歧杆菌活菌数会逐渐减少，这种趋势在老态龙钟的老年人身上尤为明显地表现出来。双歧杆菌活菌数的减少已被认为是衰老、机体免疫力下降和成人病（如癌、关节炎）发生的重要原因。

已知精神压力会导致机体内分泌失调而影响人体健康，同样精神压力也会改变肠道内微生物菌群的平衡，使双歧杆菌数急剧减少，而有毒微生物大量增殖。

没有肠道微生物菌群的无菌大鼠其平均寿命比控制组延长 50%，而喂以含有 0.5% 抗氧化剂的饲料的大鼠其平均寿命大约比控制组延长 20%。这表明，微生物菌群对人体健康的危害几乎与自由基氧化作用的危害相当。大鼠实验表明，有害的微生物菌群会促使肝脏出现癌变。

二、功能性低聚糖的生理功效

自然界中仅有少数几种食物含有天然的功能性低聚糖。例如，洋葱、大蒜、芒壳、天门冬、菊苣根和伊斯兰洋蓟块茎等含有低聚果糖，大豆中含有大豆低聚糖。但是，从一般人日常的膳食习惯看，一个人每天从天然食物中摄取的低聚糖往往很难达到日常推荐量标准。据估计，美国人平均每天从天然食物中摄取的低聚果糖量仅接近于 0.8 g/59kg 体重。从膳食中额外补充些低聚糖，对于婴幼儿、成年人、老年人、工作压力大的人和那些希望具有健康消化系统的人非常有益。

（一）促使双歧杆菌增殖、调节肠道菌群

人体试验表明，摄入低聚糖可促使双歧杆菌增殖，从而抑制了有害细菌，如产气荚膜梭状芽孢杆菌（*Clostridium perfringens*）的生长。每天摄入 2~10 g 低聚糖持续数周后，肠道内的双歧杆菌活菌数平均增加 7.5 倍，而产气荚膜梭状芽孢杆菌总数减少了 81%；对于某些品种的低聚糖发酵所产生的乳酸菌素数量也增加 1~2 倍，而产气荚膜梭状芽孢杆菌素的数量减少 0.5~0.06（ $P<0.05$ ）。

肠道中各种细菌的种类、数量和定居部位是相对稳定的，它们相互协调、相互制约，共同形成一个微生态系统，乳酸菌通过以上机制，呈优势生长，抑制病原性细菌的过度繁殖。如果由于抗生素、放疗、化疗、应激、年老或膳食不当等引起的肠内菌群失调，可通过摄取功能性低聚糖、乳酸菌制品而得以纠正。据报道，双歧杆菌制品对儿童难治性腹泻有较好的功效。接受抗生素的儿童其肠道菌群易发生紊乱导致霉菌和肠球菌占优势，厌氧菌尤其是双歧杆菌明显下降。通过摄取双歧杆菌制剂 3~7 d，即可恢复肠内双歧杆菌的优势地位，使肠道菌群正常化。

（二）抑制内毒素、保护肝脏功能

双歧杆菌发酵低聚糖，产生短链脂肪酸（主要是醋酸和乳酸，摩尔比为 3：2）和一些抗生素物质，从而可抑制外源致病菌和肠内固有腐败细菌的生长繁殖。醋酸和乳酸均能抑制肠道内肠腐败细菌的生长，减少这些细菌产生的毒胺、胺基质、吲哚、氨、硫化氢等致癌物及其他毒性物质对机体的损害，延缓机体衰老进程。双歧杆菌素（bifidin）是由两歧杆菌产生的一种抗生素物质，它能非常有效地抑制志贺杆菌、沙门菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和其他一些微生物。由婴儿双歧杆菌产生的一种高分子量物质也能有效地抑制志贺杆菌、沙门菌和大肠杆菌等。

人体体内和活体外粪便培养试验表明，摄入低聚糖可有效地减少有毒发酵产物及有害细菌酶的产生。每天摄入 3~6 g 低聚糖，或往体外粪便培养基中添加相应数量的低聚糖，3 周之内即可减少 44.6% 有毒发酵产物和 40.9% 有害细菌酶的产生。

双歧杆菌可抑制肠道中腐败菌的繁殖，从而减少肠道中内毒素及尿素酶的含量，使血液中内毒素和氨含量下降。把双歧杆菌引入肝病患者的血液，发现血氨、游离血清酚及游离的氨基氮明显减少。双歧杆菌对门脉肝硬化性脑病有缓解作用，此类患者摄入短双歧杆菌和两歧双歧杆菌 109 个/d 持续 1 个月，就可出现血氨下降现象。

摄入低聚糖或双歧杆菌可减少有毒代谢产物的形成，这大大减轻了肝脏分解毒素的负担。有关实验如下。

① 让一个 69 岁病人每天摄入大豆低聚糖 3 g，大约 5 d 后其肝昏迷和便秘症状都有所缓解。

② 有两组试验对象，一组是 12 个患有慢性肝炎或肝硬化的病人，另一组是 8 个患有肝硬化的病人，让他们持续 80 d 都食用含有大量两歧双歧杆菌的发酵乳，结果这两组患者的血清和尿中有毒代谢物浓度均大幅度下降至正常或接近正常情况，病情普遍好转，如食欲增加、蛋白质耐受性增加和体重增加（平均 2.6 kg）。

（三）调节肠胃功能、防治便秘和腹泻

摄入低聚糖或双歧杆菌均可抑制病原菌和腹泻，两者的作用机理是一样的，都是减少了肠内有害细菌的数量。

双歧杆菌发酵低聚糖产生大量的短链脂肪酸，能刺激肠道蠕动、增加粪便湿润度并保持一定的渗透压，从而防止便秘的发生。在人体试验中，每天摄入 3.0~10.0 g 低聚糖，一周之内便可起到防止便秘的效果，但对一些严重的便秘患者效果不佳。

（四）激活免疫、抗衰老和抗肿瘤

口服长双歧杆菌制品 2 d 后，再喂以病原体埃希大肠杆菌的无菌小鼠，临床上并没有什么症状。但在口服长双歧杆菌之前喂以埃希大肠杆菌，在 48 d 之内就出现死亡现象。无菌小鼠的长双歧杆菌单因子试验，也证实了双歧杆菌对宿主免疫的促进作用。双歧杆菌及其产物能诱导干扰素、促进细胞分裂而产生体液及细胞免疫，如表 1-2 所示。

表 1-2 乳酸菌的免疫激活作用

乳 酸 菌	受 试 动 物	免 疫 作 用
婴儿双歧杆菌(<i>B. infantis</i>)	小鼠	促 B 细胞分裂,活化吞噬细胞
短双歧杆菌(<i>B. breve</i>)	人(顽固性腹泻症)	促进 IgA 抗体的产生,活化吞噬细胞
长双歧杆菌(<i>B. longum</i>)	小鼠	促 B 细胞分裂,促进特异性及非特异性 IgA 抗体的产生
短双歧杆菌(<i>B. breve</i>)	小鼠	促进抗体产生

双歧杆菌的抗肿瘤作用是由于肠道菌群的改善结果，抑制了致癌物的产生，同时双歧杆菌及其代谢产物激活了免疫功能，也能抑制肿瘤细胞的增殖。大量的动物试验结果表明，双歧杆菌在肠道内大量繁殖能够起抗肿瘤作用。这种抗肿瘤作用归功于双歧杆菌的细胞、细胞壁成分和胞外分泌物，使机体的免疫力提高。例如，喂养长双歧杆菌单因子的无菌小鼠，要比未处理的无菌小鼠活得长。口服或静脉注射具有致死作用的埃希大肠杆菌或静脉注射肉毒素，在有活性长双歧杆菌同时存在的情况下，小鼠在第2~3周内，就可诱导抗致死作用。但在无胸腺的无菌小鼠中，未发现此现象。由此可见，长双歧杆菌可诱导抗埃希大肠杆菌感染的细菌免疫。

（五）降低血清胆固醇、降低血压

大量的人体试验已证实摄入低聚糖后可降低血清胆固醇水平。每天摄入6~12 g低聚糖持续2周至3个月，总血清胆固醇可降低20~50 dL。包括双歧杆菌在内的乳酸菌及其发酵乳制品均能降低总血清胆固醇水平，提高女性血清中高密度脂蛋白胆固醇占总胆固醇的比率。

血清胆固醇水平的降低被认为是由于肠道内微生物菌群平衡改变的结果。而且，体外试验表明，人体肠道内12株固有的嗜酸乳杆菌可吸收胆固醇，嗜酸乳杆菌2056株菌能抑制小肠壁对胆固醇微胞的吸收。双歧杆菌代谢产生烟酸的能力与血清胆固醇水平的降低也有一定的关系。有人认为，双歧杆菌通过抑制人体内活化的T细菌，控制新形成低密度脂蛋白接受器，起到降低血清胆固醇含量的作用。对小鼠的试验结果表明，双歧杆菌通过影响 β 羟- β -甲基戊二酸单酰辅酶A还原酶的活性，控制胆固醇的合成而降低血清胆固醇的含量。

摄入低聚糖还有降低血压的作用，有关实例如下。

① 46个高血脂患者每日摄入11.5 g低聚果糖持续5周后，其心脏舒张压平均下降799.8 Pa，空腹时的血糖值也有所降低，但不很明显。

② 让6个28~48岁身体健康的成年男性连续一周每天摄入3.0 g大豆低聚糖，其心脏舒张压平均下降了839.7 Pa。研究表明，一个人的心脏舒张压的高低与其粪便中双歧杆菌数占总菌数的比率呈明显的负相关关系。

（六）合成维生素

双歧杆菌在肠道内能自然合成维生素B₁、维生素B₂、维生素B₆、维生素B₁₂、烟酸和叶酸，但不能合成维生素K。双歧杆菌发酵乳制品中乳糖已部分转化为乳酸，解决了人们乳糖耐受性问题，同时也增加了水溶性可吸收钙的含量，使乳制品更易消化吸收。

（七）低能量或无能量、不会引起龋齿

功能性低聚糖很难或不被人体消化吸收，所提供的能量值很低或根本没有，故可在低能量食品中发挥作用，最大限度地满足了那些喜爱甜品而又担心发胖者的要求，还可供糖尿病人、肥胖病人和低血糖病人食用。

龋齿是由于口腔微生物特别是突变链球菌（*Streptococcus mutans*）侵蚀而引起的，功能性低聚糖因为不是这些口腔微生物的合适作用底物，因此不会引起牙齿龋变。

因为低聚糖不被人体消化吸收，属于低分子量的水溶性膳食纤维。低聚糖的某些生理功能类似于膳食纤维，但它不具备膳食纤维的物理特征，诸如黏稠性、持水性和膨胀性等。低聚糖的生理功能完全归功于其独有的发酵特征（双歧杆菌增殖特性）。膳食纤维尤其是水溶性膳食纤维部分也是因为其独特的发酵特性而具备某些生理功能的。但是，目前对膳食纤维发酵特性的研究还不够深入，尚无法与低聚糖的双歧杆菌增殖特性相比较。

低聚糖优于膳食纤维的特点是：①较小的日常需求量，通常每天仅需 3 g 左右；②在推荐量范围内不会引起腹泻；③具有一定的甜味，甜味特性良好，无不理想的组织结构或口感特性；④易溶于水，不增加产品的黏度；⑤物理性质稳定，不螯合矿物质元素；⑥易于添入加工食品和饮料中。

三、功能性低聚糖的有效剂量

部分功能性低聚糖的每日有效剂量是：低聚果糖 3 g、低聚半乳糖 2~2.5 g、大豆低聚糖 2 g 和低聚木糖 0.7 g。如表 1-3 所示。大豆低聚糖不会引起腹泻的最大剂量，对于男性每千克体重 0.64 g，对于女性则为 0.96 g。有一研究认为，市面上现有的商品大豆低聚糖，其可能引起腹泻的最小剂量，男性是 44 g，而女性是 48 g。

表 1-3 部分低聚糖的有效剂量和一般摄取量

名 称	最低有效剂量/(g/d)	一般摄取量/(g/d)	最大无作用量/[g/(d·60 kg)]
低聚异麦芽糖	10	>15	90
低聚果糖	3	5~8	18
低聚半乳糖	2~2.5	10	18
低聚果果糖	2	2~3	36
低聚木糖	0.7	5	7.5
棉子糖	3	5	10
大豆低聚糖	2	10	13.2
乳酮糖	3	10	—

小鼠急性毒理试验表明，低聚半乳糖的 LD₅₀ 大于 15 g/kg；亚急性和慢性毒理试验表明，每日每千克体重摄入低聚糖 4.0 g 持续 35~180 d 是安全的。小鼠亚慢性、慢性毒理试验和致突变试验表明，每日每千克体重摄入低聚果糖 2.17 g 也没有明显的副作用。各种低聚糖的最大无作用量，即不致引起腹泻的最大摄入量见表 1-3。

研究认为，似乎没有必要担心因食用低聚糖（即便是大豆低聚糖）而可能引起的肠胃胀气现象。每日饮用含 3.0 g 大豆低聚糖的碳酸饮料 100mL 持续 2 周，既不会引起肠胃胀气也不会出现腹泻现象。这可能是由于低聚糖摄入量较少（3.0 g/d），以及没有豆类碳水化合物的协同增效作用。后者会刺激肠胃出现胀气现象。

四、双歧杆菌的特性和作用

双歧杆菌属（*Bifidobacterium*）的名称早在 1924 年就由 Orla-Jensen 提出，但当时未被接受。直到 1974 年《Bergey 细菌鉴定手册》第 8 版才将其正式列入放线菌目的放线菌科下。到目前为止双歧杆菌属共报道了有 28 个种，栖居于人和动物（牛、羊、兔、鼠、猪、鸡和蜜蜂等）的肠道、反刍动物的瘤胃、人的牙齿缝穴和阴道等处。除齿双歧杆菌（*B. dentium*）可能是病原菌外，其他种尚未见有致病性的报道。

双歧杆菌的细胞呈现出多种形态，有短杆较规则形或纤细杆状带有尖细末端的细胞，有成球形者，也有长而稍弯曲状的或呈各种分枝或分叉形、棍棒状或匙形。单个或链状，V 形、栅栏状排列，或聚集成星状。革兰染色阳性，不抗酸，不形成芽孢，不运动，厌氧，在好氧条件下不能在平皿上生长，不过对氧的敏感性不同的种和菌株存有一定的差异。某些种有 CO₂ 存在时能增加对氧的耐受性，大多数种培养在 101325 Pa(1atm) 的含多量空气和 CO₂（例如是 90% 空气和 10% CO₂）的气相斜面上都不能生长。双歧杆菌属的最适生长温度 37~41℃，初始生长最适 pH 值为 6.5~7.0。分解糖，从葡萄糖产生乙酸和乳酸，两者理论上是以摩尔比为 3：2 的比例形成。当葡萄糖以独特的 6-磷酸果糖途径被降解时能产生

更多的乙酸，还有少量的甲酸与乙醇等，乳酸产量相对减少。不产 CO_2 （葡萄糖酸盐降解除外），不产丁酸和丙酸。

双歧杆菌是人体肠道内典型的有益细菌，它的生长繁殖贯穿在人的整个生命历程中。新生儿出生后 2~3 d 其粪便中就出现双歧杆菌，至第 4 d、第 5 d 双歧杆菌数量占绝对优势，随着年龄的增大，双歧杆菌数逐渐减少。最早消失的是婴儿期特有的婴儿双歧杆菌，其他肠道细菌则逐渐增多。在临死的老年人的肠道中根本不存在双歧杆菌。有分析表明，母乳喂养的婴儿肠道中双歧杆菌占绝对优势，而人工喂养婴儿肠道中虽然双歧杆菌数也占优势，但数量要比前者少得多，且其他肠道细菌明显增多，这就是母乳喂养婴儿比人工喂养婴儿抵抗力强不易患病的原因之一。肠道中双歧杆菌数量的多少，已成为衡量人体健康与否的标志之一。

五、功能性低聚糖的生产技术

有关功能性低聚糖的生产技术，大致可分为 5 种。

① 从天然原料中提取、纯化而得，如棉子糖、水苏糖的生产。

② 利用糖苷酶（包含糖基转移和水解两种作用）生产而得，如低聚果糖、低聚半乳糖、低聚乳果糖的生产。

③ 利用水解酶作用而得，如低聚木糖、低聚壳聚糖、低聚甘露糖和以菊粉为原料的低聚果糖的生产。

④ 利用酸碱法水解而得，如乳酮糖的生产，低聚木糖、低聚甘露糖等也可用酸碱法水解生产。

⑤ 化学合成法，目前仅限于进行构效关系研究所用的低聚糖的合成。

有关功能性低聚糖的酶法生产，目前大多在水相中进行。正在研究有机相中的酶促反应，以期酶促反应热力学平衡朝产物低聚糖方向转移。如在有机相中，酶促反应生产低聚果糖、低聚乳果糖、低聚异麦芽糖，其对于总糖的转化率分别可达到 40%、36% 和 62%，大大高于水相反应体系。

（郑建仙）

第二章 低聚异麦芽糖

低聚异麦芽糖 (isomaltooligosaccharide), 又称分支低聚糖 (branching oligosaccharide), 是指葡萄糖之间至少有一个以 $\alpha(1\rightarrow6)$ 糖苷键结合而成的、单糖数 2~5 不等的一类低聚糖。自然界中低聚异麦芽糖极少以游离状态存在, 但作为支链淀粉或多糖的组成部分, 在蜂蜜和某些发酵食品如酱油、黄酒或酶法制备的葡萄糖浆中都有少量存在。

第一节 物化性质和生理功效

尽管低聚异麦芽糖是一定聚合度范围的低聚糖混合物, 但在转糖苷反应产物中, 主要为异麦芽糖 (isomaltose)、潘糖 (panose) 和异麦芽三糖 (isomaltotriose), 结构见图 2-1。其他聚合度或结构的低聚异麦芽糖则较少。商品低聚异麦芽糖有 2 种规格, 主成分占 50% 以上的称为 IMO-50, 90% 以上的称为 IMO-90。

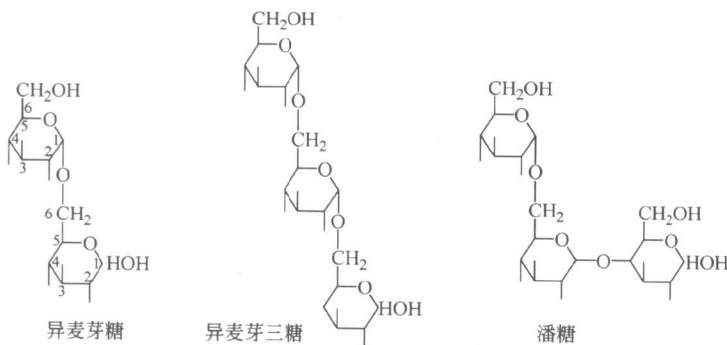


图 2-1 异麦芽糖、潘糖和异麦芽三糖的化学结构

一、物化性质

在日本, 低聚异麦芽糖用作甜味剂已有多年历史。它是从淀粉制得, 主要成分为具有 $\alpha(1\rightarrow6)$ 糖苷键的聚合度为 2~4 的低聚混合物, 如异麦芽糖、潘糖和异麦芽三糖, 这些低聚糖不能在人体内消化。

(一) 甜味

低聚异麦芽糖的甜度为蔗糖的 45%~50% (图 2-2)。在食品中加入等量糖时可降低食品甜度, 其甜味醇美、柔和, 对味觉刺激性小, 甜度随三糖、四糖、五糖等聚合度的增加而逐渐降低。它可与各种甜味料混合代替蔗糖, 降低产品的甜度及改善味觉。

(二) 黏度

低聚异麦芽糖的黏度较低, 所以具有较好的流动性和操作性。尽管该产品

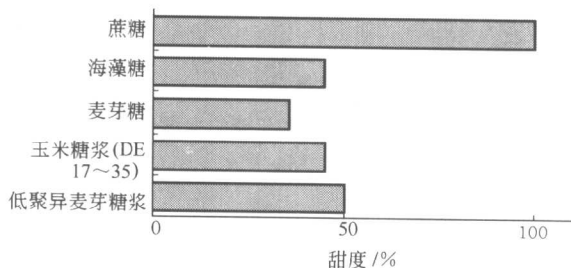


图 2-2 不同糖甜度比较

是属于寡糖类，但由于它是通过切枝再接枝的糖苷键转移反应来完成的，因此，转化程度远比生产直链低聚糖强烈。仅从评价反应程度的参数 DE 值来看，低聚异麦芽糖比低聚麦芽糖的 DE 值大得多，所以体现出其对应黏度的差异。低聚异麦芽糖在 25℃ 时的黏度曲线见图 2-3。

(三) 耐热及耐酸特性

低聚异麦芽糖的耐热、耐酸性能较好，见图 2-4。在较高温度、pH 值为 3 的酸性溶液中加热一段时间，分子仅出现很轻微的分解，因此可以在食品中广泛应用。

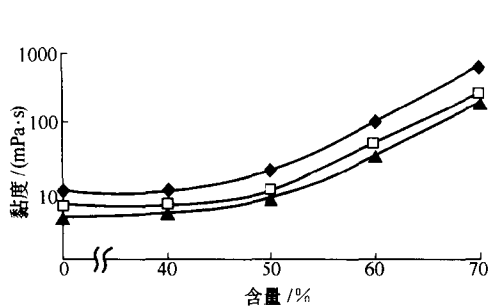


图 2-3 低聚异麦芽糖浆在 25℃ 时的黏度曲线
◆—玉米糖浆；□—低聚异麦芽糖浆；▲—蔗糖

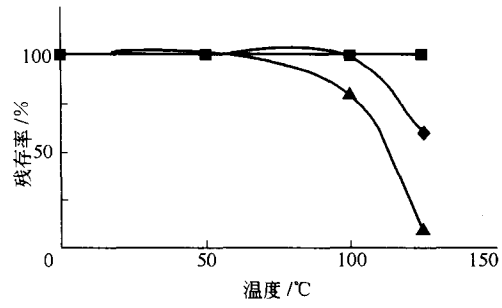


图 2-4 低聚异麦芽糖浆的耐热及耐酸性实验
■—低聚异麦芽糖浆 (pH 值为 3、4)；◆—蔗糖 (pH 值为 4)；▲—蔗糖 (pH 值为 3)

(四) 保湿、防止结晶和淀粉老化

低聚异麦芽糖具有良好的保湿性能，其在 25℃ 下的保湿性能如图 2-5 所示。低聚异麦芽糖结构上具有多个羟基，与水分子有较强的结合能力，因此用作食品配料时，可在一定程度上维持食品的水分活度，保持食品的新鲜度，对淀粉的老化回生也有一定的抑制效果。

(五) 降低冰点

与其他淀粉糖一样，低聚异麦芽糖具有降低冰点的性能，所以应用于冷冻食品、冰淇淋中，可缩短成型时间，降低能耗，改善品质。低聚异麦芽糖降低冰点的能力与蔗糖相似，而异构糖在同样的条件下使冰点下降的程度更低，如图 2-6 所示。因而低聚异麦芽糖使产品具有更易被冻结，更难被解冻的性能。

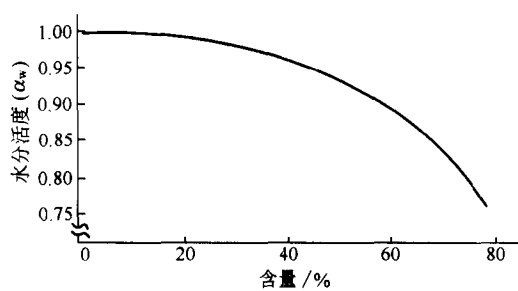


图 2-5 25℃，低聚异麦芽糖的保湿性能

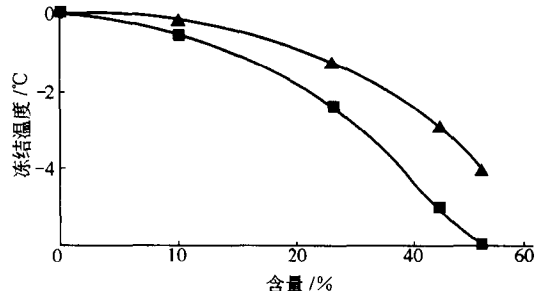


图 2-6 低聚异麦芽糖浆与异构糖在同样条件下的冻结温度之比
▲—低聚异麦芽糖浆；■—异构糖

(六) 难发酵性

低聚异麦芽糖分子结构中的分支糖是通过转移反应接上去的，属于低发酵性糖，即该产

品被酵母菌和乳酸菌利用程度较低。因此将其添加于一些发酵产品中，加工后仍可较完整地在食品中保存下来发挥作用。低聚异麦芽糖的酵母菌及乳酸菌发酵试验结果分别如图 2-7 和图 2-8 所示。

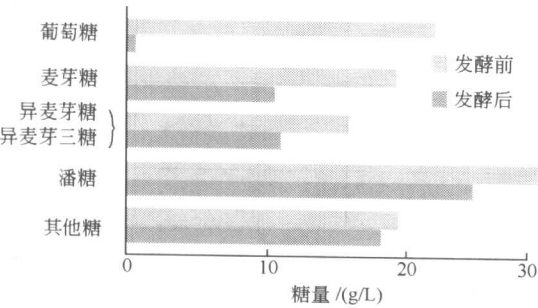


图 2-7 低聚异麦芽糖的酵母菌发酵试验

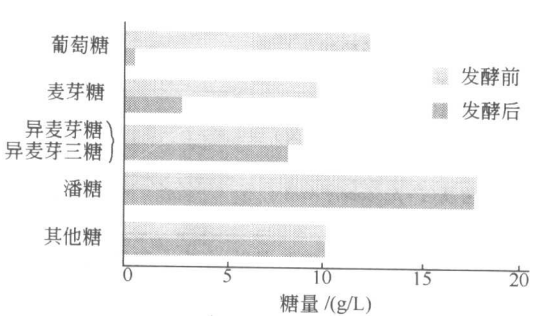


图 2-8 低聚异麦芽糖的乳酸菌发酵实验

(七) 着色性

低聚异麦芽糖与反应物中的氨基酸、蛋白质一起被加热会发生褐变反应，使产品着色，而葡萄糖及异构糖发生着色反应的稳定性不及低聚异麦芽糖，如图 2-9 所示。

二、生理功效

(一) 双歧杆菌增殖因子

人体的消化道内约有 10^{15} 个细菌，其中 100 种左右的细菌构成了肠道主要的菌群结构，这些菌群分为有益菌、致病菌和好氧菌群三大类。不同菌群对低聚异麦芽糖的利用状况见表 2-1。

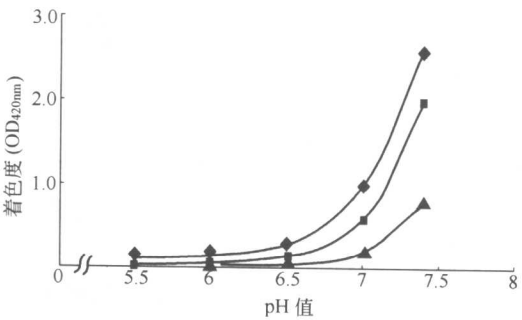


图 2-9 低聚异麦芽糖的着色实验

反应条件：糖含量 12.5%，在 100℃ 下加热 90 min；

◆—葡萄糖；■—低聚异麦芽糖浆；▲—麦芽糖

表 2-1 肠道菌群对异麦芽糖、异麦芽三糖和葡萄糖的利用

类 别	10^n	异麦芽糖	异麦芽三糖	葡萄糖
双歧杆菌属 (<i>Bifidobacterium</i>)				
<i>B. adolescentis</i> (青春双歧杆菌)	9	++	++	++
<i>B. bifidum</i> (两歧双歧杆菌)	5	—	—	—
<i>B. breve</i> (短双歧杆菌)	2	++	++	++
<i>B. infantis</i> (婴儿双歧杆菌)	7	++	++	++
真细菌属 (<i>Eubacterium</i>)				
<i>E. aerofaciens</i>	2	+	+	+
<i>E. limosum</i> (黏液真杆菌)	2	++	++	++
<i>E. moniliform</i>	5	+	+	+
拟杆菌属 (<i>Bacteroides</i>)				
<i>Bact. distasonis</i>	3	±	—	—
<i>Bact. fragilis</i> (脆弱拟杆菌)	4	—	—	—
<i>Bact. melaninogenicus</i>	3	—	—	—
乳酸菌属 (<i>Lactobacillus</i>)				
<i>L. acidophilus</i> (嗜酸乳杆菌)	6	±	—	—
<i>L. casei</i> (干酪乳杆菌)	3	—	—	—
<i>L. fermentum</i> (发酵乳杆菌)	3	—	—	—
梭状芽孢杆菌属 (<i>Clostridium</i>)				
<i>Cl. butyricum</i> (丁酸梭菌)	1	—	—	—