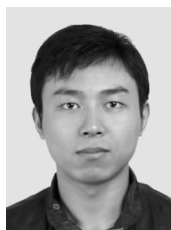


综述评论

## 木糖醇的生产技术及应用研究进展



LIU Chun

刘春, 房桂干\*, 施英乔, 邓拥军, 殷艳飞

(中国林业科学研究院林产化学工业研究所; 生物质化学利用国家工程实验室;  
国家林业局林产化学工程重点开放性实验室, 江苏南京 210042)

**摘要:** 木糖醇作为一种重要的化工产品, 具有很高的应用价值。综述了木糖醇的 3 种生产方法, 即提取法、化学合成法及生物转化法, 并分析了各种生产技术的优缺点, 总结了木糖醇在食品、医药、化工等领域的应用, 最后对木糖醇今后的发展趋势提出了见解。

**关键词:** 木糖醇; 生产技术; 应用; 发展趋势

中图分类号: TQ351.0

文献标识码: A

文章编号: 0253-2417(2010)06-0113-06

## Research Progress on Production and Application of Xylitol

LIU Chun, FANG Gui-gan, SHI Ying-qiao, DENG Yong-jun, YIN Yan-fei

(Institute of Chemical Industry of Forest Products, CAF; National Engineering Lab. for Biomass Chemical Utilization;  
Key and Open Lab. on Forest Chemical Engineering, SFA, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** As an important chemical product, xylitol has a high application value. Based on recent development, three kinds of production methods were summarized in this paper, which were extraction method, chemical synthesis method and biological method. The advantages and disadvantages of three methods were also mentioned. The application of xylitol in food, medicine and chemical industry were summarized. Finally the future development trend of xylitol was discussed.

**Key words:** xylitol; production; application; development trend

木糖醇又称为戊五醇, 是一种多元醇, 分子式为  $C_5H_{12}O_5$ , 相对分子质量为 152.15, 外观为白色结晶状粉末, 无臭味, 熔点为  $92 \sim 96 \text{ }^\circ\text{C}$ , 易溶于水, 溶解度  $169 \text{ g} (20 \text{ }^\circ\text{C})$ , 溶解热  $-145.6 \text{ J/g}$ , 热能  $16.99 \text{ J/g}^{[1]}$ 。微溶于甲醇、乙醇、醋酸, 不溶于乙醚、氯仿。木糖醇有一定的吸湿性, 味甜, 甜度相当于蔗糖, 发热量相当于葡萄糖。木糖醇是综合利用农业废弃物、采用高新技术生产的、具有很高实用价值的化工产品<sup>[2]</sup>。木糖醇广泛应用于化工、医药、食品等领域, 可制取表面活性剂、乳化剂、破乳剂、醇酸树脂及涂料, 可代替甘油应用于造纸、日用品及国防工业, 又是医药工业制造各种药物的原料。由于木糖醇在人体内的代谢与胰岛素无关, 故适用于生产糖尿病患者食品。世界上只有中国、俄罗斯、芬兰、美国、意大利等少数国家生产木糖醇, 产量都不大、生产历史也不长。近几年来, 市场对木糖醇的需求日趋旺盛。我国是农业大国, 原料丰富, 发展木糖醇工业具有得天独厚的条件。近来, 国内外学者对木糖醇的制备与应用领域做了大量的理论研究工作。作者系统总结木糖醇的主要生产方式, 探讨了目前木糖醇生产与应用研究的热点与趋势。

### 1 木糖醇的生产技术

木糖醇的生产技术主要有 3 种: 提取、化学合成和生物发酵法。提取法产量低, 成本高, 不能满足市

收稿日期: 2010-07-05

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划资助 (2006BAD198B0705)

作者简介: 刘春 (1985-), 男, 湖北荆州人, 硕士生, 主要从事竹材制浆与功能性产品开发研究工作; **E-mail:** iuchun1@sina.com

\* 通讯作者: 房桂干 (1966-), 博士生导师, 主要从事制浆造纸清洁高效生产工艺研究; **E-mail:** fanguigan@yahoo.com.cn。

场需要;在工业化大生产中,主要以传统的化学加氢法生产木糖醇,但弊端较多;生物发酵法是如今研究的热点,但研究成果大多数还处于实验室阶段<sup>[3]</sup>。

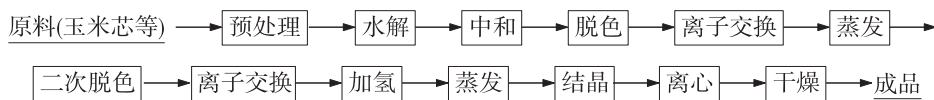
### 1.1 提取法

早在 1890 年,德国科学家 Fisher、Stahe 和法国科学家 Betiand 就发现了木糖醇,然而在自然界植物中首次发现木糖醇却是在 1943 年。木糖醇广泛存在于各种果蔬食物中<sup>[4]</sup>,其含量(以每 100 g 干物质或每 100 mL 汁液中木糖醇的毫克数计)分别为(mg):香蕉 21.0、青梅 925.0、草莓 362.0、苹果汁 120.0、菠萝 21.0、南瓜 96.5、菠菜 107.0、莴苣 131.0、卷心菜 94.0、茴香 92.0、花椰菜 300.0、胡萝卜 86.5、洋葱 89.0、白蘑菇 128.0 等。

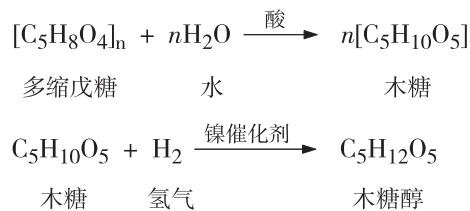
提取法制备木糖醇,就是用固液萃取的方法将木糖醇从果蔬食物中提取出来。虽然木糖醇广泛存在于各种果蔬食物中,但含量都较低。花椰菜中木糖醇含量相对较高,但也只有干质量的 0.3%,大量生产较困难且不经济<sup>[5]</sup>。芬兰、俄罗斯等欧洲国家拥有及其丰富的白桦树资源,因此成为木糖醇生产大国。直至今日,这些国家仍沿用传统的桦木蒸煮法来生产木糖醇,即用白桦木片经水蒸气蒸煮后得到粗糖液,再经精制即可得到结晶木糖醇产品。不过,该方法不仅要消耗大量森林资源,而且产品收率低。

### 1.2 化学合成法

**1.2.1 传统化学合成法** 在稀酸催化剂的作用下,植物纤维原料(如稻草、玉米芯等)中的木聚糖经水解可制得木糖,木糖在一定压力下,以镍为触媒,加氢制得木糖醇。传统的生产技术路线为:



主要反应式为:



这是现今工业化应用最普遍的方法,但此法需高温(115~135℃)、高压(约 6.5 MPa)、易燃易爆的高压氢气及对溶液纯度要求很高的镍催化剂、繁杂的分离和净化工序。该法基本建设投资和操作费用高,污染较严重,而且很难生产出高纯度的成品。

**1.2.2 化学加氢法工艺的改进与发展** 科研人员对化学加氢合成木糖醇技术不断进行改进,山东禹城福田药业有限公司技术中心针对传统工艺中各个工段进行了较大的改进<sup>[6]</sup>,主要有:原料正式水解前进行 3 步预处理:即水洗、酸煮、水煮,然后再加酸水解,将原料中的灰分彻底清洗,使产品质量得到了保证;省去中和工序,水解液直接脱色;采用脱色树脂与活性炭并用的脱色工艺代替单一的活性炭脱色;采用了无顶压离子交换器代替敞口式离子交换器;蒸发工序采用多效降膜蒸发器替代老式中央循环管蒸发器,使蒸发一吨料液蒸汽消耗降低 50% 多;以间歇加氢工艺替代连续加氢工艺;采用最新超滤技术及物料补偿性连续真空结晶的工艺。改进后的生产工艺不仅降低了原辅料消耗,使产品各项指标全部提升达到美国 FCCIV 版和美国药典 USP23 版的标准。

**1.2.3 电解还原法合成木糖醇** 目前有报道利用电解还原法合成木糖醇。纪延光等<sup>[7]</sup>以自制电极为阴极,Pt 电极为阳极,H 型电解池带隔膜电解,阴极电位 -1.2 V,始槽压 4.2 V,阴极液为 2 g 木糖溶于 60 mL 水中,支持电解质分别为 HCl、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub>、LiCl、AcOH、Mg(AcO)<sub>2</sub>,电解温度 30~70℃,电解 18.5 h。木糖还原后为中性分子,在电场中不移动,然后采用电渗析法除去阴阳离子,达到净化目的。粗产品液从通道进入电渗析仪,经 5 段分离后蒸发水分至黏稠液转移到表面皿上,80℃ 干燥箱烘干得木糖醇产品。黄玉秀<sup>[8]</sup>利用电解还原法制备木糖醇,木糖转化率达到 95% 以上。此工艺后处理简单,

无需加压设备,但电极催化活性不够,能耗较高,需要进一步完善、提高。

### 1.3 生物转化法

由于提取和化学合成法存在明显的缺点和不足,国内外科研工作者经过努力探索,找到一种木糖醇生产的新途径——生物转化法。生物转化法的基本原理为农业废弃物(如稻草、蔗渣、玉米芯等)所含的多缩戊糖经稀酸水解后得到木糖水解液,然后利用微生物发酵水解液中的木糖可得木糖醇。微生物发酵法不仅有可能省去木糖纯化步骤,还可以简化木糖醇的分离步骤,是一种很有前途的生产方法<sup>[9]</sup>。但目前,生物发酵法生产木糖醇还处于实验室阶段,工业生产应用较少。

**1.3.1 发酵菌种与途径** 自然界中能利用木糖的微生物种类很多,包括细菌、放线菌、霉菌以及酵母菌等。迄今为止,有棒状杆菌属(*Corynebacterium sp*)、肠细菌属(*Enterobacter liquefaciens*)、分枝杆菌属(*Mycobacterium smegmatis*)等种属中的很少一部分,可以发酵木糖生产木糖醇。但由于木糖醇只是这类细菌正常生理代谢过程中一种中间产物,产量相当小,因此还没有生产价值。Izumori等<sup>[10]</sup>发现*M. smegmatis*将木糖转化为木糖醇的能力较强,转化率达70%。

极少数霉菌能发酵木糖产生木糖醇,如*Penicillium*、*Aspergillus*、*Rhizopus*、*Byssoschlamys*和*Neurospora spp.*等,在含有木糖培养基中能产生低浓度木糖醇。Dahiya<sup>[11]</sup>将*Petromyces albertensis*接种在初始木糖质量浓度为100 g/L培养基中,培养10 d后,测得木糖醇质量浓度为39.8 g/L。

在微生物中,酵母转化木糖生产木糖醇性能最为优越<sup>[9]</sup>。*Candida*属酵母转化能力较强<sup>[12-13]</sup>,如*C. tropicalis*<sup>[14]</sup>、*C. guilliermondii*、*C. mogii*、*C. parasitosis*<sup>[15]</sup>。其他转化能力较强的有:*Debaryomyces*属,如*D. hansenii*; *Pachysolen*属,如*Ptannophilus*<sup>[16]</sup>等。Barbosa<sup>[17]</sup>从44株酵母中研究发现*C. guilliermondii*和*C. tropicalis*可在24 h内利用D-木糖90%以上。其他种属如*Saccharomyces*属和*Schizosaccharomyces*属也有一定的转化能力。

发酵过程是利用微生物辅酶细胞壁中的活性氢(离子氢)在木糖还原酶的作用下使水解液中的木糖还原加氢生成木糖醇<sup>[18-19]</sup>,同时净化水解液中的六碳糖,如:葡萄糖、半乳糖、甘露糖等则作为细胞的营养剂消耗在细胞生长过程中。

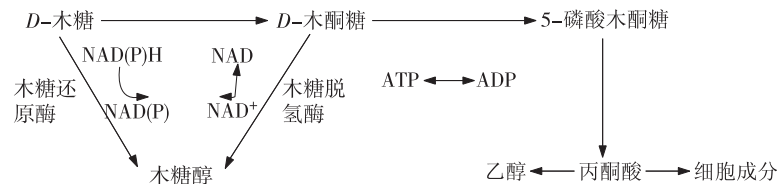
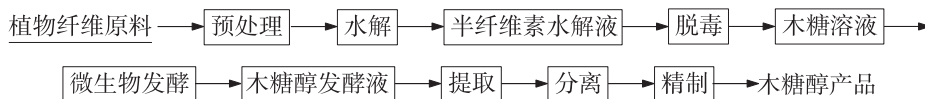


图1 D-木糖的同化途径

Fig. 1 Scheme of D-xylose metabolism

**1.3.2 发酵工艺** 微生物发酵植物纤维原料生产木糖醇工艺流程如下:



采用发酵法生产木糖醇之前必须对半纤维素原料进行预处理。一方面,通过预处理和酸水解可降低纤维晶体分子聚合度,改变空间构型,使其变得更易进行酶促反应;另一方面,通过脱毒除去有害物质,提高水解液发酵性能。

龚霄等<sup>[16]</sup>提出影响发酵法生产木糖醇的主要影响因素有:通气量、初始木糖浓度、氮源、初始细胞浓度、温度、pH值、其他单糖、金属离子及发酵方式等,为研究木糖醇的发酵工艺提供了依据。张晓元等<sup>[20]</sup>利用热带假丝酵母研究发酵木糖生产木糖醇的发酵条件。用摇瓶发酵优化工艺,得到最佳培养基条件为:初始木糖50 g/L,蛋白胨5 g/L,酵母粉10 g/L,硫酸镁0.5 g/L,磷酸二氢钾5 g/L,硫酸铵1 g/L。最佳发酵条件为:pH值6.0,摇瓶发酵装液量50 mL/250 mL,转速200 r/min,发酵温度30℃,发酵时间28 h。邓立红等<sup>[21]</sup>研究出初始木糖在80 g/L附近时木糖醇转化率较高;限制性供氧条件下有利

于木糖醇积累。酵母膏和蛋白胨是比较适合产木糖醇的有机氮源,而酵母膏更利于酵母细胞生长。Kwon 等<sup>[22]</sup>采用一种嗜高渗的热带假丝酵母对发酵方式进行了对比实验。结果表明:分批培养中,这种酵母菌在初始木糖质量浓度 200 g/L 的情况下生产木糖醇的最高速率为 3.5 g/(L·h);在补料分批培养中,保持木糖的质量浓度为 260 g/L,48 h 后木糖醇质量浓度达到 234 g/L,生成速率为 4.88 g/(L·h);在细胞再循环发酵中,采用深层膜生物反应器,用空气喷射循环酵母细胞发酵生产木糖醇,在每次发酵 19.5 h 后,木糖醇平均质量浓度为 180 g/L,生成速率为 8.5 g/(L·h),转化率为 85%。细胞再循环发酵中木糖醇的生产速率与总产量分别为分批发酵的 3.4 和 11.0 倍。

### 1.3.3 发酵法的发展与研究趋势

**1.3.3.1 利用基因技术选育菌种** 近年来,随着转基因技术的发展,用转基因技术进行菌种选育,从而提高菌种转化木糖生产木糖醇的能力,成为研究的热点。Jeun 等<sup>[23]</sup>从 *P. stipitis* 和 *Azotobacter vinelandii* 中克隆得到木糖还原酶基因 XP 和转运酶基因 STH,并将其导入到菌株 *S. cerevisiae* BJ 3505 中得到重组株 *S. cerevisiae* BJ3505/XR/STH,然后进行木糖发酵,木糖初始质量浓度为 100 g/L,测得结果如下,木糖醇质量浓度 60.0 g/L,生成速率 1.58 g/(L·h)。远远高于初始菌株(7.50 g/L、0.20 g/(L·h))。

**1.3.3.2 固定化细胞技术应用**于在木糖醇工业中 固定化发酵与游离发酵相比,可以重复使用,极大地提高了反应效率。林海等<sup>[24]</sup>利用聚乙烯醇作为主要包埋剂固定化季也蒙假丝酵母(*Candida guilliermondii*),并添加海藻酸钠和活性炭作为添加剂,包埋剂配比为聚乙烯醇 8%、海藻酸钠(SA)1%、活性炭(C)1.5%,交联剂为饱和  $H_2BO_3-4\% CaCl_2$ ,固定化细胞微珠在缓冲溶液中的破裂时间提高到 140 h,并且可以连续进行 24 d 以上的发酵,木糖醇得率提高到 67.9%,机械强度也提高了近 3 倍。Carvalho 等<sup>[25]</sup>用海藻酸钙固定化 *C. guilliermondii* 转化甘蔗渣水解液中的木糖,发酵 120 h 转化率可达到 0.81 g/g,木糖醇的浓度和生成速率分别为 47.5 g/L 和 0.40 g/(L·h)。

**1.3.3.3 以葡萄糖为底物发酵生产木糖醇**<sup>[18]</sup> 若能以来源广泛、价格低廉的葡萄糖为底物发酵,必然会降低木糖醇的生产成本促进其大规模生产。但是在自然界中还没有发现直接发酵葡萄糖生产木糖醇的微生物。有研究者尝试了混合发酵法,它是利用 3 种具有不同代谢功能的微生物以葡萄糖为出发底物,分三步进行发酵:第一步由 *D. hansenii* 发酵葡萄糖,产生 D-阿拉伯糖醇;第二步由 *A. suboxydans* 将 D-阿拉伯糖醇氧化为 D-木酮糖;最后由 *C. guilliermondii* 将木酮糖被还原为木糖醇。但其耗时长,产量低而且副产品产量高,纯化难度大。如何降低副产物产量以及降低纯化难度已成为研究的热点。

在微生物发酵法中,因为培养液中杂质含量低,因而分离和收集木糖醇较化学法要简单得多,产品纯度相应得到提高。此外,其专一性强,可省去高压设备和大量催化剂,节省能耗,简化工艺,减少环境污染,变废为宝。随着生物工程技术的不断提高,生物转化法必然在未来的木糖醇生产中占主导地位。

## 2 木糖醇的功能与应用

木糖醇是一种重要的五碳糖醇,是所有食用糖醇中生理活性最好的品种,有许多独特的功能,广泛应用于食品、医药及化工等行业中。

### 2.1 在食品工业中的应用

由于木糖醇在体内的代谢与胰岛素无关,故应用于糖尿病患者食品的生产;木糖醇在口中有清凉感,同时在口中不被细菌发酵生成乳酸,对微生物是不良的培养基,所以不龋齿,可用于制作口香糖;木糖醇作为食糖代用品具有独特的优点,其在食品加工时不会因加热而发生“美拉德”褐变反应,这因为木糖醇与糖类不同,没有醛基,不会和氨基酸发生反应使食品色泽加深;木糖醇不受酵母菌和细菌的作用、不霉变,可延长食品的保存期。所以木糖醇广泛应用在口香糖、巧克力、饮料、糖果等制品中<sup>[26-28]</sup>。木糖醇可作为酒类的添加剂,日本研究认为:加入 0.5%~3.0% 的木糖醇,能改进酒的色、香、味,可使酒类香味芳醇,浓郁饱满,绵柔可口,并有减少微生物败坏的特性<sup>[29]</sup>。

### 2.2 在医药工业中的应用

**2.2.1 治疗糖尿病**<sup>[30-31]</sup> 木糖醇化合物对糖尿病人治疗有较好效果,因木糖醇在代谢过程中,不需要

胰岛素参与作用,能快速进入细胞,被完全利用,不至于影响血糖浓度。木糖醇并能供给糖尿病人能量,缓和病人脂肪与蛋白质的不正常分解现象,防止酮体生成,预防病人发生酸血症及昏睡症,其作用远较葡萄糖、果糖或其他五碳糖类要强。

**2.2.2 木糖醇的防龋特性**<sup>[32-33]</sup> 木糖醇不能被口腔中产生龋齿的细菌发酵利用,抑制链球菌生长及酸的产生;其次它能促进唾液分泌,减缓 pH 值下降,减少了牙齿的酸蚀,防止龋齿和减少牙斑的产生,可以巩固牙齿。

**2.2.3 改善肝功能**<sup>[29]</sup> 木糖醇可促进肝糖元的合成,降低转氨酶,减慢血浆中脂肪酸的产生;使血液中乳酸、丙酮酸、葡萄糖含量下降,胰岛素含量上升,改善肝功能,起到护肝保肝作用。2005年,中国中医研究院西苑医院进行的木糖醇辅助护肝功能临床报告指出:对100位肝病患者进行临床对照试验,试食组要求每日加食木糖醇30g,连续3个月。结果表明,加食木糖醇组在恢复肝功能等方面有一定的作用。对病人的脂肪肝、高脂血症也有改善作用,其临床症状、肝功能、血脂均有改善。说明木糖醇是辅助护肝调脂的保健营养品。

**2.2.4 治疗肺感染**<sup>[4]</sup> 木糖醇治疗肺感染的功能是美国衣阿华州立大学于2000年发现的,引起了医学界关注。木糖醇虽非抗菌物质,但它能使患者呼吸道表面黏液层中盐度下降,故有利于患者恢复预防肺部感染的能力。而且木糖醇不像其他的抗生素那样在杀死细菌的同时也为其提供了抗体,从而增加了没被杀死的细菌的抗药性,而木糖醇只是将有害细菌驱赶走而已。

### 2.3 在化学工业中的应用

<sup>[34]</sup>

木糖醇与C5~C9脂肪酸酯化可制得耐热的增塑剂,用于鞋底、农用薄膜、人造合成革和电缆料等;木糖醇可作为起始剂制聚醚,是进一步合成硬质泡沫塑料的基本原料;利用木糖醇具有5个羟基的特点,作为甘油和食用油代用品,应用于造纸、日用化工产品、国防工业中;木糖醇可用于生产具有抗菌作用的表面活性剂;木糖醇可与酚、甲醛用正磷酸和硼酸催化,得到黏稠透明的液体,是很好的皮革鞣剂;木糖醇比六元醇的耐热性和抗腐蚀性能优异,是应用前景较佳的重要乳化剂。

## 3 展望

木糖醇存在于许多水果和蔬菜中,但含量都很低,直接提取困难而且费用昂贵。木糖化学催化加氢法是目前工业生产木糖醇的主要方法,虽然经过了不断的探索与改进,取得了不错的进展,但这一生产工艺需要单独制氢,并要在高温高压下反应,工艺复杂,安全性差,成本较高,污染也比较严重。生物发酵法制备木糖醇能够节省能耗,简化工艺,减少环境污染,提高产品质量。这些年,研究者在发酵法制备木糖醇方面做了大量的工作,也取得了重要的理论研究成果。目前应用最多、转化能力较强的菌种为热带假丝酵母<sup>[35-36]</sup>,但伴随基因工程的发展,将进一步筛选转化效果更好的微生物。发酵设备也应进一步改进,以便扩大生产,提高生产率。有报道称2009年唐传生物科技(厦门)有限公司利用生物发酵法制取木糖醇生产线第一期工程成功投产,这是全世界第一家采用生物发酵法制取木糖醇的企业,它标志着生物发酵法制备木糖醇逐渐迈向产业化道路,但其工业应用才刚刚起步,尚需探索和完善。

木糖醇工业是一个新兴工业,发展迅速,原料易得,产品用途广泛,市场前景广阔,是一个很有发展前途的工业,但生产工艺落后,很大程度上制约了木糖醇工业的发展。努力探索生物发酵法制备木糖醇工艺,进而产业化,将是今后木糖醇生产发展的方向。应掌握行业发展趋势,积极开发新品种、高档产品,促进企业技术进步,提升产品质量,降低生产成本,并参与国际竞争,与国际惯例接轨,发挥行业协会的作用,走联合发展的道路。

### 参考文献:

- [1]黄静.木糖醇的合成、应用及市场前景[J].牙膏工业,2003(3):36-38.
- [2]张凤清,张丽君,周长民.木糖醇的特性及应用[J].当代化工,2008,37(1):92-95.
- [3]李梅.木糖醇的生产工艺进展[J].石油化工应用,2007,26(6):8-11.

- [4] 成英, 闫书磊, 明立雪. 木糖醇的生产工艺及应用研究进展[J]. 甘肃石油和化工, 2008, 22(3): 18-21.
- [5] 郑建仙. 功能性糖醇[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-6.
- [6] 王关斌, 赵光辉. 木糖醇的生产与发展趋势[J]. 浙江化工, 2005, 36(2): 25-26.
- [7] 纪延光, 高健. 木糖醇合成新法[J]. 四川食品工业科技, 1996, 15(4): 51-53.
- [8] 黄玉秀. 电膜法生产木糖醇工艺[J]. 应用化学, 1997, 14(32): 105-106.
- [9] 徐俊, 郑建仙, 葛亚中. 木糖醇的发酵法生产[J]. 中国食品添加剂, 2003(5): 44-49.
- [10] IZUMORI K, TUZAKI K. Production of xylitol from *D*-xylose by *Mycobacterium smegmatis*[J]. Journal of Fermentation Technology, 1988, 66(1): 33-36.
- [11] DAHIYA J S. Xylitol production by *Petromyces albertensis* grown on medium containing *D*-xylose[J]. Can J Microbiol, 1991, 37(1): 14-18.
- [12] DANIELA B G, FRANCISLENE A H, ADALBERTO P Jr, et al. The behavior of key enzymes of xylose metabolism on the xylitol production by *Candida guilliermondii* grown in hemicellulosic hydrolysate[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2009, 36(1): 87-93.
- [13] GURPIHARES D B, PESSOA A Jr, ROBERTO I C. Glucose-6-phosphate dehydrogenase and xylitol production by *Candida guilliermondii* FTI 20037 using statistical experimental design[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(3): 631-637.
- [14] OH D K, KIM S Y. Increase of xylitol yield by feeding xylose and glucose in *Candida tropicalis*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, 50(4): 419-425.
- [15] KIM S Y, KIM J H, OH D K. Improvement of xylitol production by controlling oxygen supply in *Candida parapsilosis*[J]. Journal of fermentation and bioengineering, 1997, 83(3): 260-270.
- [16] 龚霄, 贺稚非, 陈盼, 等. 发酵法生产木糖醇研究进展[J]. 粮食与油脂, 2008(3): 44-48.
- [17] BARBOSA M F S, MEDEIROS M B, MANCILHA I M, et al. Screening of yeasts for production of xylitol from *D*-xylose and some factors which affect xylitol yield in *Candida guilliermondii*[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 1988, 3(4): 241-251.
- [18] 吴春霞, 阙建全. 酵母菌转化木糖生产木糖醇的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2007(3): 110-113, 72.
- [19] 任鸿均, 张忠涛. 木糖醇生产工艺的新突破——生物加氢技术[J]. 化工科技市场, 2007(2): 42-49.
- [20] 张晓元, 王松梅, 朱希强, 等. 热带假丝酵母发酵法生产木糖醇的研究[J]. 食品与药品, 2006, 8(11A): 27-30.
- [21] 邓立红, 王艳辉, 张扬, 等. 热带假丝酵母发酵生产木糖醇的研究[J]. 食品与发酵工业, 2004(3): 37-40.
- [22] KWON S G, PARK S W, OH D K. Increase of xylitol productivity by cell-recycle fermentation of *Candida tropicalis* using submerged membrane bioreactor[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(1): 13-18.
- [23] JEUN Y S, KIM M D, PARK Y C, et al. Expression of *Azotobacter vinelandii* soluble transhydrogenase perturbs xylose reductase-mediated conversion of xylose to xylitol by recombinant *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2003, 26(3/4/5/6): 251-256.
- [24] 林海, 许平, 周虹. 聚乙烯醇(PVA)微珠发酵生产木糖醇能力的改进研究[J]. 四川食品与发酵, 2006, 42(5): 27-31.
- [25] CARVALHO W, SANTOS J C, ANILHA L C, et al. Xylitol production from sugarcane bagasse hydrolysate: Metabolic behaviour of *Candida guilliermondii* cells entrapped in Ca-alginate[J]. Biochemical Engineering Journal, 2005, 25(1): 25-31.
- [26] 王仲礼. 前景广阔的食糖替代品——木糖醇[J]. 江苏调味副食品, 2005, 22(2): 1-4.
- [27] 崔福顺, 李春花, 周丽萍. 木糖醇的生理功能及其在食品工业中的应用[J]. 延边大学农学学报, 2003, 25(4): 298-300.
- [28] 马培忠, 许金木, 韩维成. 木糖醇的生产及应用[J]. 河南科技, 1997(4): 16-17.
- [29] 尤新. 木糖醇的功能及其食品应用[J]. 应用科技, 2009, 17(16): 13-15.
- [30] 张宝成. 木糖醇的由来及用途[J]. 化学教育, 2006(2): 7-9.
- [31] 苑振云, 张如春. 木糖醇的临床应用概况[J]. 河北医药, 2003, 25(6): 453-454.
- [32] 杨远志, 杨海军. 功能性糖醇[J]. 精细与专用化学品, 2004, 2(1): 11-12.
- [33] 冯永强, 王江星. 木糖醇的特性及在食品中的应用[J]. 食品科学, 2005, 25(11): 379-381.
- [34] 任鸿均. 木糖醇的生产新技术及其应用[J]. 化工科技市场, 2005(2): 1-6.
- [35] DANIELA V C, INES C R. Improved xylitol production in media containing phenolic aldehydes: Application of response surface methodology for optimization and modeling of bioprocess[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2010, 85(1): 33-38.
- [36] KIM T B, OH D K. Xylitol production by *Candida tropicalis* in a chemically defined medium[J]. Biotechnology Letters, 2003, 25(24): 2085-2088.