

微生物发酵法预处理植物油脱臭馏出物

胡 骏¹, 杜晓楠¹, 赵国群^{1,2,*}

(1. 河北科技大学生物科学与工程学院, 河北石家庄 050018;

2. 河北省发酵工程技术研究中心, 河北石家庄 050018)

摘要: 研究了一种新的植物油脱臭馏出物预处理方法即微生物发酵法。首先筛选出了能代谢利用脂肪酸的热带假丝酵母1253, 然后使用该酵母发酵大豆油脱臭馏出物。在发酵过程中, 随着菌体的生长, 脱臭馏出物中脂肪酸被代谢消耗, 提高了其中植物甾醇的含量, 成功地实现了脱臭馏出物的浓缩。大豆油脱臭馏出物的适宜发酵培养基为: 脱臭馏出物40g/L, 尿素1.0g/L, MgSO₄ 0.1g/L, K₂HPO₄ 0.2g/L, KH₂PO₄ 0.2g/L。将热带假丝酵母1253接种到上述培养基中, 30℃、200r/min摇床发酵96h, 脱臭馏出物中脂肪酸消耗率达到70.21%, 其中的植物甾醇含量由起始的15.2%提高到了28.43%。微生物发酵法预处理脱臭馏出物是一种技术上可行的、替代甲酯化预处理的方法。

关键词: 脱臭馏出物, 脂肪酸, 植物甾醇, 发酵, 热带假丝酵母

Pretreatment of vegetable oil deodorizer distillate by microbial fermentation

HU Tao¹, DU Xiao-nan¹, ZHAO Guo-qun^{1,2,*}

(1. College of Bioscience and Bioengineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. Fermentation Engineering Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: A new pretreatment method, microbial fermentation of vegetable oil deodorizer distillate (VODD), was tried in this work. A yeast strain *Candida tropicalis*1253 was screened, which could utilize fatty acids as carbon source for cell growth, and was fermented soybean oil deodorizer distillate (SODD). During the fermentation, fatty acids in SODD were utilized and converted into cellular components as the yeast cells grew, phytosterols concentration in SODD increased, and SODD was successfully concentrated. The optimal cultural medium of SODD was: SODD 40g/L, urea 1.0g/L, MgSO₄ 0.1g/L, K₂HPO₄ 0.2g/L, KH₂PO₄ 0.2g/L. The medium above was inoculated with *Candida tropicalis*1253, and the cultures were fermented at 30℃ in a shaker at 200r/min for 96h. When the fermentation was finished, consumption of fatty acids in SODD was 70.21%, and phytosterols concentration in SODD increased from 15.2% to 28.43%. Pretreatment of VODD by microbial fermentation was a technically feasible process and can replace pretreatment of methyl esterification of fatty acids in VODD.

Key words: deodorizer distillate; fatty acids; phytosterols; fermentation; *Candida tropicalis*

中图分类号: TS229

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2014)12-0147-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2014.12.023

植物油脱臭馏出物是植物油精炼过程中的一个副产品。植物油脱臭馏出物成分非常复杂, 主要含有脂肪酸、植物甾醇、维生素E、甘油酯及其他组分, 其中脂肪酸含量最高^[1-2]。植物油脱臭馏出物是植物甾醇和天然维生素E的主要来源。

由于脂肪酸与植物甾醇、维生素E理化性质比较接近, 难于直接进行分离, 需采取一定的措施对原料进行适当的预处理, 加大脱臭馏出物中脂肪酸与其他成分性质的差异, 为后续的分离提取创造良好的条件。因此, 采用预处理脱除脂肪酸, 通常是从植物油脱臭馏出物中分离提取植物甾醇和天然维生素E的第一步。最常用的预处理方法是将先脂肪酸转化

为沸点较低的脂肪酸甲酯, 使其与植物甾醇、维生素E沸点差达60℃以上, 再采用真空蒸馏等手段将脂肪酸甲酯脱除, 获得浓缩的脱臭馏出物, 从而简化后续的植物甾醇与维生素E的分离工艺^[3]。目前脂肪酸的甲酯化主要有化学法和酶法。化学酯化法的缺点是使用大量浓硫酸、甲醇, 腐蚀设备, 污染环境^[4]。酶酯化法的优点是反应条件温和, 催化效率高, 无三废排放, 但脂肪酶价格高, 操作寿命短^[5-7]。

针对植物油脱臭馏出物预处理工艺存在的问题, 本文尝试了一种新的预处理方法即微生物发酵法, 通过发酵过程中微生物生长所造成的脱臭馏出物中脂肪酸的消耗, 实现了脱臭馏出物的浓缩; 同时所收获的微生物细胞, 干燥后还可作为动物饲料。作为甲酯化的替代工艺, 这种微生物发酵预处理方法成本低、能耗小、无环境污染, 对于植物甾醇和天然维生素E生产过程的节能减排具有重要的意义。

收稿日期: 2013-09-02 * 通讯联系人

作者简介: 胡骏(1977-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 生物催化技术。

基金项目: 河北省高校科学研究优秀青年基金项目(Y2011106)。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

大豆油脱臭馏出物(Soybean oil deodorizer distillate, SODD) 石家庄益海粮油有限公司提供, 经测定, 其中含66.13%游离脂肪酸、15.2%植物甾醇; 热带假丝酵母(*Candida tropicalis*) 1253、产朊假丝酵母(*Candida utilis*) 1769、扣囊复膜孢酵母(*Fibuligera*) 1717、白地霉(*Geotrichum candidum*) 1745 中国工业微生物菌种保藏中心。

LG16-B型高速离心机 北京雷勃尔设备有限公司; 752型紫外可见分光光度计 上海光谱仪器有限公司; ZHWY-2102C型恒温培养振荡器 上海智城分析仪器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 种子培养基 葡萄糖20g/L, 蛋白胨20g/L, 酵母粉10g/L, K_2HPO_4 2.0g/L, pH7.2。

1.2.2 平板筛选培养基 大豆油脱臭馏出物60g/L, 酵母粉0.5g/L, 琼脂18g/L, pH7.0。

1.2.3 发酵基本培养基 大豆油脱臭馏出物50g/L, 酵母粉1.0g/L, $MgSO_4$ 0.1g/L, K_2HPO_4 0.2g/L, KH_2PO_4 0.2g/L, pH7.0。

1.2.4 种子液的制备 将2~3环斜面培养物接种至装有100mL种子培养基的250mL三角瓶中, 30℃、200r/min摇床振荡培养24h。

1.2.5 微生物菌种的筛选 分别将制备好的热带假丝酵母1253、产朊假丝酵母1769、扣囊复膜孢酵母1717、白地霉1745种子液涂布到平板筛选培养基上, 30℃恒温培养, 定期观察菌落生长情况。

1.2.6 脱臭馏出物的发酵 将热带假丝酵母1253种子液以5% (v/v) 的接种量, 接种到装有100mL发酵基本培养基的250mL三角瓶中, 于30℃、200r/min的摇床中发酵108h。

1.2.7 脱臭馏出物起始浓度对脂肪酸消耗的影响 将发酵基本培养基中脱臭馏出物含量分别调整为40、50、60、80、100g/L, 其他组分保持不变。按5%接种量接入热带假丝酵母1253种子液, 30℃、200r/min, 摇床发酵96h。

1.2.8 氮源对脂肪酸消耗的影响 将发酵基本培养基中脱臭馏出物含量调整为40g/L, 其中的氮源分别调整为(1.0g/L): 酵母粉、蛋白胨、尿素、 $(NH_4)_2SO_4$ 、 NH_4Cl 和 $NH_4H_2PO_4$ 。接入热带假丝酵母1253种子液后, 30℃、200r/min摇床发酵96h。

1.2.9 无机盐的影响 将发酵基本培养基调整为脱臭馏出物含量40g/L、尿素1.0g/L、 K_2HPO_4 0.2g/L、 KH_2PO_4 0.2g/L, 并其分别添加0.1g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.01g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.05g/L $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.02g/L $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 、0.1g/L $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 和0.02g/L $CoCl_2 \cdot 6H_2O$; 没有添加无机盐的发酵基本培养基设为对照。上述培养基接种热带假丝酵母1253后, 30℃、200r/min摇床发酵96h。

1.2.10 植物甾醇释放的监测 将发酵培养基调整为: 脱臭馏出物含量40g/L、尿素1.0g/L、 $MgSO_4$ 0.1g/L, K_2HPO_4 0.2g/L, KH_2PO_4 0.2g/L。接种热带假丝酵母

1253后, 30℃、200r/min摇床发酵96h, 定期取样, 监测发酵液中植物甾醇的含量。

1.3 测定方法

1.3.1 热带假丝酵母菌体生长的测定 取1.0mL发酵液, 8000r/min离心10min, 所获得的沉淀在80℃烘箱中烘干至恒重, 称量得菌体干重(g/L)。

1.3.2 脱臭馏出物中脂肪酸的测定 发酵结束后, 发酵液降温至4℃, 静止放置2h, 将凝固的残存脱臭馏出物分离出来, 在80℃烘箱中烘干至无游离水, 然后参照国家标准GB/T 5530-2005《动植物油脂酸值和酸度测定》(以油酸计)进行脂肪酸的测定。

1.3.3 脱臭馏出物及发酵液中植物甾醇的检测 采用磷硫铁色法测定^[8]。

2 结果与分析

2.1 微生物菌种的筛选

用于脱臭馏出物发酵的理想微生物菌种应为:

a. 能高效代谢利用脱臭馏出物中的游离脂肪酸及甘油酯; b. 菌体有其他工业价值, 如可用作单细胞蛋白。产朊假丝酵母、热带假丝酵母、扣囊复膜孢酵母、白地霉菌均可作为单细胞蛋白发酵生产菌, 因此, 选择这4种酵母菌作为研究对象。

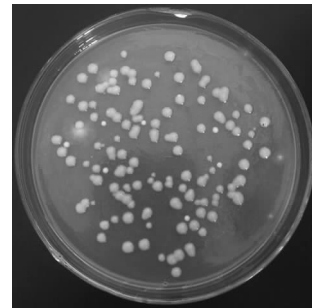


图1 热带假丝酵母1253在平板筛选培养基上生长的菌落
Fig.2 The colonies of *C. tropicalis* 1253 grown the screening agar medium

将上述4种酵母菌的种子液, 适当稀释后涂布于以脱臭馏出物为唯一底物的平板筛选培养基上, 然后30℃下恒温培养。经过约4d的培养之后, 发现只有热带假丝酵母1253生长出许多菌落(图1), 而其他三个实验菌株均未发现有菌落出现。这种结果说明, 只有热带假丝酵母能以脱臭馏出物中脂肪酸及甘油酯为碳源进行生长。韩云等也发现热带假丝酵母可以高效降解色拉油加工废水中的脂肪酸和油脂^[9]。在有氧情况下, 脂肪酸在热带假丝酵母体内经过 β -氧化和三羧酸循环途径最终降解为二氧化碳和水, 从而为菌体生长提供了必要的碳源和能源物质^[10]。因此, 选择热带假丝酵母1253为脱臭馏出物发酵的适宜菌株。

2.2 脱臭馏出物发酵

热带假丝酵母1253发酵大豆油脱臭馏出物的实验结果见图2。如图2所示, 在第一发酵阶段(0~12h), 酵母细胞呈现快速生长, 细胞干重从1.47g/L快速增加至5.67g/L, 但脱臭馏出物中脂肪酸的浓度几乎不降低, 脂肪酸没有被消耗, 这意味着这一阶段菌体生

长所消耗的碳源不是脂肪酸,其可能的原因是:脂肪酸及甘油酯是一个相对不易利用的碳源,而酵母粉既是良好的氮源,也是良好的碳源,从而被优先利用。在这一发酵阶段,脱臭馏出物中甾醇的浓度也几乎没有增加。在第二发酵阶段(12~36h),细胞生长缓慢,然而脱臭馏出物中脂肪酸浓度却明显下降。这可能表明发酵培养基中的酵母粉已被消耗殆尽,而脂肪酸开始作为碳源而被代谢利用,因而细胞对碳源转化有一个适应期,表现为生长缓慢。由于脂肪酸的消耗,因而观测到脱臭馏出物中植物甾醇浓度增加。在第三发酵阶段(36~96h),细胞再次快速生长,出现二次生长现象。与此同时,脂肪酸的消耗和脱臭馏出物中植物甾醇浓度也快速增加,但细胞的生长速率要大于脂肪酸的消耗速率,这表明脱臭馏出物的其他成分如甘油酯在细胞生长时也被代谢利用。在发酵的最后阶段(96~108h),细胞生长几乎停止,脱臭馏出物中脂肪酸浓度略有下降。经过发酵,脱臭馏出物中脂肪酸浓度由开始的66.13%降低为38.46%,而植物甾醇浓度从15.2%增加为23.91%,实现了脱臭馏出物的浓缩。

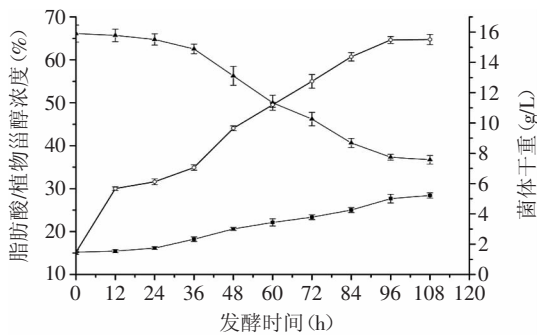


图2 热带假丝酵母1253发酵大豆油脱臭馏出物
Fig.2 Fermentation of SODD with *C. tropicalis* 1253

2.3 发酵培养基对脂肪酸消耗的影响

2.3.1 脱臭馏出物起始浓度的影响 植物油脱臭馏

表1 脱臭馏出物起始浓度对其发酵的影响

Table 1 Effect of initial SODD concentration on fermentation of SODD

脱臭馏出物(g/L)	菌体干重(g/L)	脱臭馏出物中脂肪酸含量(%)	脂肪酸消耗率(%)	脱臭馏出物中植物甾醇含量(%)
40	15.30±0.18	45.62±0.95	57.02±0.95	24.12±0.52
50	15.21±0.25	47.63±1.02	53.42±1.02	23.23±0.38
60	12.78±0.16	50.78±1.13	47.15±1.13	21.87±0.30
80	10.56±0.13	54.30±1.32	39.15±1.32	20.17±0.41
100	9.48±0.11	56.85±1.45	32.52±1.45	19.15±0.26

表2 氮源对脱臭馏出物发酵的影响

Table 2 Effect of nitrogen source on fermentation of SODD

氮源	菌体干重(g/L)	脱臭馏出物中脂肪酸含量(%)	脂肪酸消耗率(%)	脱臭馏出物中植物甾醇含量(%)
酵母粉	15.50±0.17	47.21±1.05	54.21±1.05	23.52±0.56
蛋白胨	16.81±0.19	44.05±0.95	59.68±0.95	24.87±0.61
(NH ₄) ₂ SO ₄	19.31±0.22	40.23±0.75	65.55±0.75	26.35±0.49
尿素	20.49±0.27	37.36±0.65	69.45±0.65	27.76±0.57
NH ₄ Cl	18.67±0.32	41.25±0.58	64.00±0.58	25.92±0.52
NH ₄ H ₂ PO ₄	17.54±0.21	43.34±0.84	60.83±0.84	25.12±0.45

出物不溶于水,因而漂浮在培养基的表面,形成一个油层;而热带假丝酵母发酵脱臭馏出物是一个好氧过程,漂浮的脱臭馏出物对发酵体系的传质和传氧均有影响,因此,培养基中脱臭馏出物的起始浓度是一个很重要参数。如表1所示,随着培养基中脱臭馏出物起始浓度的增加,酵母细胞的生长而逐渐降低。脱臭馏出物起始浓度越高,菌体生长越差,在脱臭馏出物中残存的脂肪酸越多,这与高起始浓度所造成的氧气供给不足有关;与之相对应,脂肪酸消耗率和植物甾醇含量也越低。如果降低脱臭馏出物起始浓度,可改善菌体生长,提高脂肪酸消耗率,但发酵罐的发酵能力会降低。通过加强通气和搅拌应会在较大程度上克服这个问题。

2.3.2 氮源的影响 氮源是微生物生长最重要的营养成分之一。为了确定热带假丝酵母1253发酵脱臭馏出物的适宜氮源,在发酵培养基中分别使用了几种有机与无机氮源,实验结果见表2。从表2中可以看出,无机氮源使得酵母细胞生长好于有机氮源。尤其是,当尿素为氮源时,菌体生长得最好,发酵后脱臭馏出物中脂肪酸含量最低(37.36%),脂肪酸消耗率高达69.45%。有机氮源如酵母粉富含蛋白质、氨基酸、维生素、微量元素等营养成分。当碳源为葡萄糖时,就微生物的生长而言,通常有机氮源要好于无机氮源。之所以出现上述实验结果,很可能与碳源由葡萄糖转化为脂肪酸有关。

2.3.3 无机盐的影响 无机盐也是微生物生长的重要营养成分。表3是6种无机盐对热带假丝酵母1253发酵脱臭馏出物影响的实验结果。从表3中可以发现,无机盐对菌体生长及脂肪酸代谢有很大影响。同没有添加无机盐的对照相比,FeSO₄、CoCl₂、ZnSO₄、MnCl₂均显著抑制细胞生长,降低脂肪酸消耗率。特别是,MnCl₂在实验浓度下显示出了强烈的抑制生长作用,而CaCl₂则对热带假丝酵母1253生长几乎没有影响。在所实验的6种无机盐中,只有MgSO₄表现出了非常显著的刺激细胞生长的作用。当发酵培养基中添加

表3 无机盐对脱臭馏出物发酵的影响

Table 3 Effect of mineral salts on fermentation of SODD

无机盐	菌体干重(g/L)	脱臭馏出物中脂肪酸含量(%)	脂肪酸消耗率(%)	脱臭馏出物中植物甾醇含量(%)
FeSO ₄	9.65±0.12	45.17±0.95	57.72±0.95	24.63±0.47
MgSO ₄	15.32±0.22	36.72±0.87	70.21±0.87	28.43±0.51
CaCl ₂	10.54±0.16	42.25±1.02	62.48±1.02	25.95±0.62
CoCl ₂	7.75±0.11	48.42±1.12	51.84±1.12	23.17±0.42
MnCl ₂	5.85±0.08	53.18±1.35	41.73±1.35	21.03±0.38
ZnSO ₄	9.42±0.13	47.29±0.94	53.97±0.94	23.68±0.46
Control	10.65±0.17	41.76±0.96	63.21±0.96	26.17±0.53

0.1g/L MgSO₄·7H₂O时,脂肪酸消耗率达到70.21%,发酵后的脱臭馏出物植物甾醇含量达到28.43%。微生物细胞生长对Mg²⁺有较高的需求,而且这种需求是不能被其他金属离子代替的。Mg²⁺参与酵母细胞生长及代谢的调节,Mg²⁺的缺乏影响酵母细胞的生长^[11]。

2.4 植物甾醇的释放

在植物油脱臭馏出物中,植物甾醇是与脂肪酸、维生素E、甾醇酯、甘油酯等成分是混合在一起的。为确定在脱臭馏出物的发酵过程中,随着脂肪酸的代谢消耗,植物甾醇是否会释放进入发酵液,监测了脱臭馏出物发酵过程中发酵液中的植物甾醇含量,实验结果见图3。如图3所示,发酵液中植物甾醇的浓度随着发酵时间的延长而增加,这表明脱臭馏出物中一部分植物甾醇已经被释放到了发酵液中。然而,所释放的植物甾醇总量很低,植物甾醇的损失量仅为0.036%,因此,其损失可以忽略不计。发酵过程中植物甾醇损失量微小与植物甾醇不溶于水的特性有很大关系。

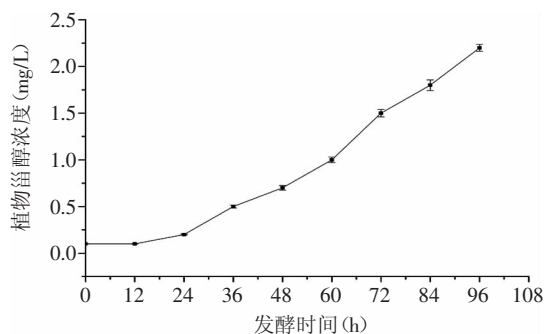


图3 大豆油脱臭馏出物发酵期间植物甾醇的释放

Fig.3 Release of phytosterols form SODD during fermentation

3 结论

本研究采用以大豆油脱臭馏出物为唯一碳源的培养基,筛选出了能代谢利用脂肪酸的热带假丝酵母1253,并使用该酵母液态深层发酵大豆油脱臭馏出物。实验结果表明,在发酵过程中,随着菌体的生长,脱臭馏出物中的脂肪酸作为碳源被代谢消耗,从而提高了其中的植物甾醇含量,成功地实现了脱臭馏出物的浓缩。在发酵过程中,植物甾醇的损失微小,可以忽略不计。这种预处理方法在常温常压下进行,发酵后浓缩的脱臭馏出物易于与微生物菌体分离,不需价格高昂脂肪酶,不使用有毒有害的物质,没有环境污染。发酵所产生的菌体,干燥后还可作为

单细胞蛋白用于动物饲料。因此,微生物发酵法是一种技术上可行的替代化学法和酶法预处理的方法。实验结果还表明,大豆油脱臭馏出物的适宜发酵培养基为:脱臭馏出物40g/L,尿素1.0g/L,MgSO₄ 0.1g/L,K₂HPO₄ 0.2g/L,KH₂PO₄ 0.2g/L。将热带假丝酵母1253种子液接种到上述培养基中,于30℃、200r/min的摇床进行发酵。经过96h发酵,脱臭馏出物中脂肪酸消耗率达到70.21%,其中的植物甾醇含量由起始的15.2%提高到了28.43%。大豆油脱臭馏出物也含有维生素E。在本研究中,没有监测发酵过程中维生素E的变化,但发酵后维生素E含量也相应增加。然而,在本实验条件下,微生物发酵法预处理后大豆油脱臭馏出物中植物甾醇含量达到了28.43%,而其植物甾醇含量的理论最大值为44.87%;植物油脱臭馏出物成分复杂,可能影响热带假丝酵母生长的因素较多,热带假丝酵母在以脱臭馏出物为底物时的生长速度远低于葡萄糖,因此,脱臭馏出物的微生物发酵工艺还有待于进一步优化和改善。

参考文献

- [1] Martins P F, Ito V M, Batistella, C B, *et al.* Free fatty acid separation from vegetable oil deodorizer distillate using molecular distillation process[J]. *Sep Purif Technol*, 2006, 48(1): 78-84.
- [2] Gunawan S, Novy S, Kasim N S, *et al.* Separation and purification of squalene from soybean oil deodorizer distillate[J]. *Sep Purif Technol*, 2008, 60(2): 128-135.
- [3] 唐年初, 袁爱泳, 姚专. 油脂脱臭馏出物富集V_E的预处理研究概述[J]. *中国油脂*, 2006, 31(11): 53-56.
- [4] 曹莹, 谷克仁, 孟冬, 等. 植物甾醇提取方法研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2006, 14(5): 25-28.
- [5] 唐年初, 袁爱泳, 胥传来. 大豆油脱臭馏出物的酶法甲酯化新工艺[J]. *食品科学*, 2007, 28(2): 142-144.
- [6] Zhou W W, Qin D H, Qian J Q. Optimisation of enzymatic pretreatment of soybean oil deodorizer distillate for concentration of tocopherols[J]. *Int J Food Sci Tech*, 2009, 44(7): 1429-1437.
- [7] Wang L, Du W, Liu D, *et al.* Lipase-catalyzed biodiesel production from soybean oil deodorizer distillate with absorbent present in tert-butanol system[J]. *J Mol Catal B:Enzym*, 2006, 43(1): 29-32.
- [8] 高瑜莹, 袁爱泳, 潘秋琴, 等. 植物甾醇分析方法[J]. *中国油脂*, 2001, 26(1): 25-28.
- [9] 韩云, 张昱, 杨清香, 等. 五株分离酵母菌的甘油酯和脂肪

酸降解活性比较[J]. 中国环境科学, 2005, 25(S1): 39-42.

[10] 刘树臣, 焦鹏, 曹竹安. 热带假丝酵母代谢烷烃过程中的 β -氧化和代谢调控[J]. 微生物学报, 2002, 42(1): 125-128.

[11] Walker G M, Maynard A I. Magnesium-limited growth of *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme Microb Tech*, 1996, 18(6): 455-459.

(上接第139页)

锅处理30min后, 其黏度有所降低, 但没有预期降低的程度大。

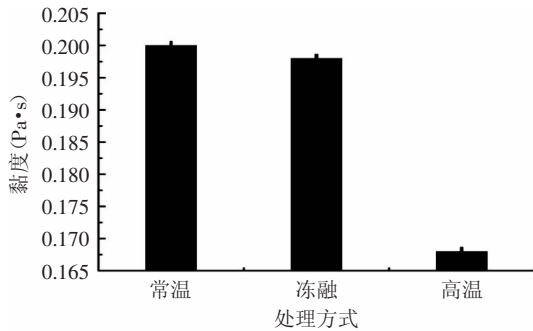


图7 经冻融和高温灭菌处理后塔拉胶溶液(0.5%, w/v)的黏度
Fig7 The apparent viscosity of tara gum solution (0.5%, w/v) with freezing-thawing and heat-pressure treatments

2.8 塔拉胶的动态流变特性

预实验表明, 在振荡应力0.7~1.9Pa内, 塔拉胶溶液处于线性粘弹区, 其复合模量 G^* 呈线性变化。因此, 实验中固定振荡应力为1.1Pa, 探讨了浓度为1% (w/v)的塔拉胶溶液的动态流变性质^[15]。在动态流变学研究中, 储能模量 G' 表示应力能量暂时储存, 之后可以恢复, 反映物质的类固体性质即弹性; 损耗模量 G'' 表示流动所耗能量, 是不可逆的, 转变为剪切热, 反映物质的类液体性质即粘性^[8, 16]。由图8可知, 塔拉胶溶液(1%, w/v)的动态黏度 η' 随振荡频率增加而降低, 表现为剪切稀化, 这与静态流变研究结果相符。另外, 塔拉胶溶液具有一定的粘弹性, 其在低频区域, $G'' > G'$, 表现为似液体的粘性流动行为; 然而在高频段, $G' > G''$, 表现为似固体的弹性行为, 其动态模量交点为2.8Hz。

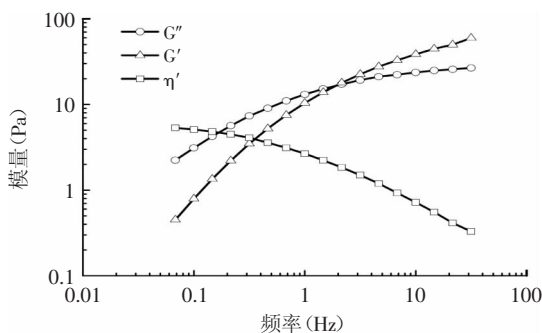


图8 塔拉胶溶液(1.0%, w/v)的动态流变特性

Fig.8 Mechanical spectra of tara gum solution (1.0%, w/v)
注: 剪切应力: 1.1Pa。

3 结论

静态流变研究表明, 塔拉胶溶液为假塑性流体,

不具有触变性, 其表观黏度随剪切速率增加而降低, 并随浓度升高而增大, 其流动模型符合幂律模型。盐(NaCl、CaCl₂)、蔗糖和温度对塔拉胶溶液的黏度均有一定的影响, 但酸碱环境对其黏度影响不大。经冻融处理后, 塔拉胶溶液黏度仍可保持相对稳定, 但经高温灭菌锅处理后其黏度有所降低。动态流变研究表明, 塔拉胶溶液具有一定的粘弹性。上述研究结果为塔拉资源开发以及塔拉多糖在食品和日用化工的高值利用提供了参考。

参考文献

[1] 詹晓北. 食用胶的生产、性能与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 176.

[2] 朱莉伟, 杨晓琴, 蒋建新, 等. 塔拉豆及其化学成分的研究[J]. 中国野生植物资源, 2003, 22(5): 24-26.

[3] 李宏梁, 刘辉. 瓜尔豆胶的流变性质及其复配性的研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(8): 209-214.

[4] Khandari, P, Gill B S, Sodhi N S. Effect of concentration and temperature on the rheology of mango pulp[J]. *Food Science and Technology*, 2002, 39(2): 152-154.

[5] 陈克复, 卢晓江, 金醇哲, 等. 食品流变学及其测量[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1989: 26-27.

[6] 徐学林, 张正东, 励杭泉. 葡聚糖水溶液触变性及其动态黏弹性研究[J]. 计量技术, 2009(7): 38-40.

[7] 冯绪胜, 刘洪国, 郝京诚, 等. 胶体化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 49-57.

[8] 刘敦华, 谷文英. 沙蒿籽胶的流变学性质研究[J]. 食品科学, 2006, 27(2): 76-80.

[9] 李泽珍, 陈敏, 朱小聪. 芥蓝胶流变学特性的研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(10): 116-119.

[10] 卢晓黎, 雷鸣, 陈正纲, 等. 常用低浓度食品胶溶液粘度的影响因素研究(3)[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2001, 33(1): 78-80.

[11] 冯涛, 顾正彪, 金征宇. 凉粉草胶的稳剪切流变学性质[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(2): 46-49.

[12] 蒋建新, 朱莉伟, 安鑫南, 等. 植物多糖胶流变性质的研究[J]. 中国野生植物资源, 2003, 22(5): 29-33.

[13] 周建芳, 张黎明, Perter H. 两性瓜尔胶衍生物溶液的流变特征[J]. 物理化学学报, 2003, 19(11): 1081-1084.

[14] Marcotte M, Hoshahili A R T, Ramaswamy H S. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature[J]. *Food Research International*, 2001, 34: 695-703.

[15] Junichi H, Ryosuke Y, Toshikazu T. Rheological properties of concentrated solutions of galactomannans in an ionic liquid[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89: 1018-1021.

[16] 陈海华, 许时婴, 王璋. 亚麻籽胶的流变性质[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(1): 31-33.