

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.014

# 餐厨垃圾水解液发酵产油脂特性及动力学研究

曾小康<sup>1,2,3</sup>, 孙士权<sup>1,3</sup>, 高 阳<sup>1</sup>, 胡文涛<sup>1</sup>, 孙欣悦<sup>1</sup>, 蒋昌波<sup>1</sup>, 吴方同<sup>1</sup>,  
万俊力<sup>1</sup>, 周 璐<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国电建集团中南勘测设计  
研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 3. 湖南省环境保护河湖污染控制工程技术中心,  
湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为探究餐厨垃圾水解液发酵产油脂的动力学特征和影响因素,以 *Saccharomyces cerevisiae* As2.516 (*S. cerevisiae* As2.516) 为供试菌株,在初始餐厨垃圾水解液加入量为 90%、搅拌速率为 180 r/min、通气量为 2.5 L/min、发酵周期为 10 d 的条件下,进行 1 L 发酵罐发酵实验。实验结果表明,*S. cerevisiae* As2.516 的最优初始培养条件如下:pH 值为 6、温度为 30 ℃、生物接种量为 10%;在此实验条件下,发酵第 7 天油脂产量最高达 4.6 g/L,此时生物量为 13 g/L,油脂产率为 36.1%;发酵产生的脂肪酸主要由 C16 和 C18 脂肪酸组成。餐厨垃圾水解液中的无机盐钠 ( $\text{Na}^+$ )、钾 ( $\text{K}^+$ )、铁 ( $\text{Fe}^{3+}$ )、镁 ( $\text{Mg}^{2+}$ )、锰 ( $\text{Mn}^{2+}$ ) 含量丰富,除需添加微量硫酸铜 ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.1 mg/L) 外,无需额外添加其他无机盐。同时基于 Logistic 方程和 Luedeking-Piret 等方程建立了 *S. cerevisiae* As2.516 菌体生长、产物生成、底物还原糖消耗 3 个发酵动力学模型,较好地描述了餐厨垃圾水解液培养菌体产油脂发酵过程中菌体生长、油脂合成以及底物还原糖消耗的过程。

**关键词:** 餐厨垃圾水解液; 酿酒酵母; 微生物油脂; 发酵; 动力学

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0083-06

## Characteristics and Kinetics of Oil Production from Kitchen Waste Hydrolysate Fermentation

ZENG Xiao-kang<sup>1,2,3</sup>, SUN Shi-quan<sup>1,3</sup>, GAO Yang<sup>1</sup>, HU Wen-tao<sup>1</sup>, SUN Xin-yue<sup>1</sup>,  
JIANG Chang-bo<sup>1</sup>, WU Fang-tong<sup>1</sup>, WAN Jun-li<sup>1</sup>, ZHOU Lu<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 3. Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging Pollution Control, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To investigate the kinetic characteristics and influencing factors of oil production from kitchen waste hydrolysate fermentation, a fermentation experiment was carried out in a 1 L fermenter, in which *Saccharomyces cerevisiae* As2.516 (*S. cerevisiae* As2.516) was used as a test strain the dosage of initial kitchen waste hydrolysate was 90%, agitation speed was 180 r/min, aeration rate was 2.5 L/min

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309032); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基金资助项目(2016490911); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(17B014)

通信作者: 孙士权 E-mail: shiquan\_sun@csust.edu.cn

and fermentation cycle was 10 days. The initial optimal culture conditions for *S. cerevisiae* As2.516 were as follows: pH of 6, temperature of 30 °C and inoculation percentage of 10%. Based on the optimum culture condition, the highest oil yield was 4.6 g/L on the 7th day of fermentation, the biomass was 13 g/L and the oil yield rate was 36.1%. Fatty acids produced by fermentation were mainly composed of C16 and C18 fatty acids. Contents of sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), iron ( $\text{Fe}^{3+}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) and manganese ( $\text{Mn}^{2+}$ ) in the kitchen waste hydrolysate were abundant, and there was no need to add other inorganic salts except for adding trace copper sulfate ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.1 mg/L). In addition, three fermentation kinetics models of *S. cerevisiae* As2.516 growth, production formation and substrate (reducing sugar) depletion were established based on Logistic and Luedeking-Piret equations, and the process of cell growth, oil synthesis and substrate (reducing sugar) consumption could be well described by these models.

**Key words:** kitchen waste hydrolysate; *Saccharomyces cerevisiae*; microbial oils; fermentation; kinetics

微生物油脂也被称为单细胞油脂,通常由酵母、霉菌、细菌和藻类等微生物制得,其组分与脂肪酸和植物油相似,可作为制取生物柴油的原料,成为生物柴油领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>。富含蛋白质、淀粉、纤维素、氨基酸、油脂、糖类、钠、镁、铁、钙、磷、氮等物质的餐厨垃圾,以及水解产生的微量元素和有机物,可为微生物发酵产油脂提供原材料,为解决当前生物柴油原料成本过高等问题提供了思路<sup>[4-7]</sup>。

餐厨垃圾水解液内含有大量的多糖、氨基酸等营养物质,可以明显促进 *Saccharomyces cerevisiae* As2.516 (*S. cerevisiae* As2.516) 等为代表的产油脂菌的菌群增殖<sup>[7-8]</sup>。为研究餐厨垃圾水解液发酵产油脂的动力学特征和影响因素,笔者对一株 *S. cerevisiae* As2.516 在 1 L 发酵罐中分批发酵餐厨垃圾水解液产油脂过程进行研究,探讨其产油脂特性及其动力学过程,旨在为餐厨垃圾水解液发酵产生生物柴油小试数据的放大、大型发酵工艺的设计及工业化应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

菌株:酿酒酵母 *S. cerevisiae* As2.516 属于酵母菌科,单细胞,卵圆形或球形,具有细胞壁、细胞质膜、细胞核(极微小,常不易见到)、液泡、线粒体及各种贮藏物质,例如油滴、肝糖等。实验使用的 *S. cerevisiae* As2.516 购于湖南微生物所,在中国工业微生物菌种保藏管理中心的编号为 CICC31276。

培养基: PDA 斜面培养基。

发酵培养基:餐厨垃圾水解液培养基,主要成分

为多类还原糖、氨基酸等<sup>[7-8]</sup>,还原糖类含量为 10% ~ 16%,氨基酸态氮含量为 180 ~ 220 mg/L。

实验药品均为分析纯,包括 3,5-二硝基水杨酸、亚硫酸钠、酒石酸钾钠、浓盐酸、甲醇、氯仿、氯化钠、淀粉酶、糖化酶、蛋白酶、纤维素酶等。

实验用发酵罐:自制自控式(BIOT-1CS)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 餐厨垃圾水解液

餐厨垃圾来源于长沙理工大学食堂,去除其中的木筷、骨头及纸巾等杂物,粉碎打成浆,按质量比为 1:1 加去离子水形成混合液。向混合液中加入一定量的蛋白酶、糖化酶、淀粉酶和纤维素酶,在 pH 值为 6、温度为 55 °C 的条件下,水解 30 min 以后经 4 000 r/min 的转速离心制得餐厨垃圾水解液,将其灭菌脱毒后备用。

#### 1.2.2 发酵

挑取一定量的 *S. cerevisiae* As2.516 菌株于 PDA 培养基中,在 30 °C 和 180 r/min 条件下振荡 10 h,按照体积分数为 10% 的接种量转接入发酵种子液培养基中,在 30 °C 和 180 r/min 条件下振荡 12 h 制得种子液( $\text{OD}_{600} \geq 1.2$ )。加入体积分数为 90% 的初始餐厨垃圾水解液、体积分数为 10% 的种子液,在 pH 值为 6、温度为 30 °C、搅拌速率为 180 r/min、通气量为 2.5 L/min 的条件下进行发酵,分析上清液和菌体<sup>[7-10]</sup>。

#### 1.2.3 检测项目及方法

菌体密度:间隔 4 h 量取一定量的发酵液,高速离心 20 min,采用 0.9% 的氯化钠溶液重悬沉淀,测

定  $OD_{600}$ 。

菌体干质量:取 1 mL 发酵液于离心管中,4 ℃ 高速冷冻离心 20 min,80 ℃ 烘干。

油脂产量:采用酸热法提取油脂并测定质量。

还原糖的测定:采用 DNS 法测定上清液中还原糖含量。即吸取 100  $\mu$ L 发酵液加入 3 mL DNS 试剂,沸水浴显色 5 min,定容至 25 mL,测定  $OD_{550}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境影响因子

*S. cerevisiae* As2.516 受环境因子影响较大,其中 pH 值和温度影响最为显著(见图 1)。

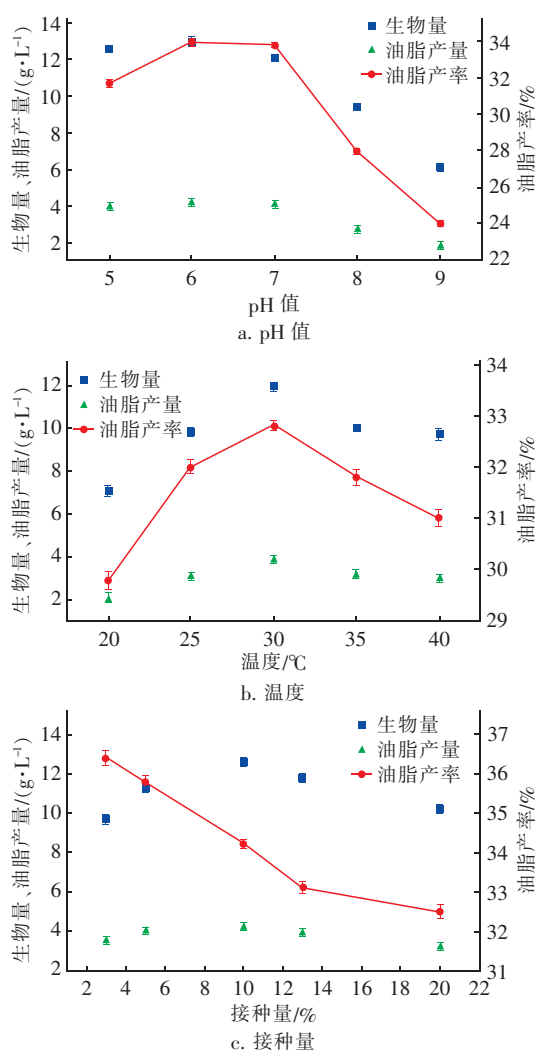


图1 环境因子对 *S. cerevisiae* As2.516 利用餐厨垃圾水解液发酵产油脂的影响

Fig.1 Influence of environmental factors on the production of oil by *S. cerevisiae* As2.516 from kitchen waste hydrolysate fermentation

微生物培养环境的 pH 值既可以影响细胞膜表

面电荷,又可以影响营养介质离子化程度,而且决定着细胞摄取营养以及排泄的过程,从而对微生物生命活动产生影响。从图 1(a)可知,当培养液 pH 值为 5~9 时,生物量、油脂产量和油脂产率均先增大后减小。在 pH 值为 6 时,*S. cerevisiae* As2.516 的生物量和油脂产率达到最大值,分别为 13 g/L 和 34%。温度是影响微生物生长与存活的重要因素之一,温度不但影响生化反应速率和微生物生长速率,还对微生物机体如蛋白质、核酸等产生影响,当环境温度过低或者过高时,微生物可能完全停止增长。由图 1(b)可知,当培养温度在 20~40 ℃ 时,*S. cerevisiae* As2.516 的生物量和油脂产率均先增大后减小,在培养温度为 30 ℃ 时,生物量和油脂产率达到最大值,分别为 11.90 g/L 和 32.71%。对真菌发酵而言,适宜的接种量既能降低菌种污染风险,又可以缩短发酵时间、提高发酵效率。由图 1(c)可知,当接种量在 3%~20% 时,*S. cerevisiae* As2.516 的生物量和油脂产量均先增大后减小,当接种量为 10% 时,其生物量和油脂产量达到最大值,分别为 12.64 和 4.43 g/L;但油脂产率却随接种量的增加而不断降低。综上所述,在不同 pH 值、温度和接种量下,生物量和油脂产量的变化规律相似,经分析生物量与油脂产量具有正相关性,说明环境因子影响了 *S. cerevisiae* As2.516 的性能,进而影响了生物量和油脂产率。

### 2.2 产油脂特征

在 pH 值为 6、温度为 30 ℃ 和接种量为 10%、餐厨垃圾水解液中初始还原糖的含量为 11.36% 的条件下,进行产油脂特征分析。*S. cerevisiae* As2.516 发酵第 2 天进入对数生长期(见图 2),第 7 天进入稳定期。*S. cerevisiae* As2.516 菌体的生长周期包括调整期、对数期、稳定期和衰减期,呈 S 型曲线。*S. cerevisiae* As2.516 菌体对还原糖的利用也呈 S 型曲线,还原糖含量先缓慢下降再快速下降至稳定阶段,稳定时还原糖的含量降至 1.0% 以下。0~2 d,*S. cerevisiae* As2.516 繁殖缓慢,消耗还原糖的速率慢,油脂产量少;第 2~6 天菌体属于对数期,随着 *S. cerevisiae* As2.516 菌体生长率和还原糖消耗速率增大,油脂产量也随之升高,在第 7 天油脂产量和油脂产率均达到最大值,分别为 4.6 g/L 和 36.1%,此时发酵液中还原糖含量下降至 2%。第 8~9 天,生物量达到最大值,但油脂产量逐渐下降,说明发酵液中

还原糖基本耗尽,菌体以自身积累的油脂维持生命代谢,与之前报道<sup>[8-10]</sup>类似。

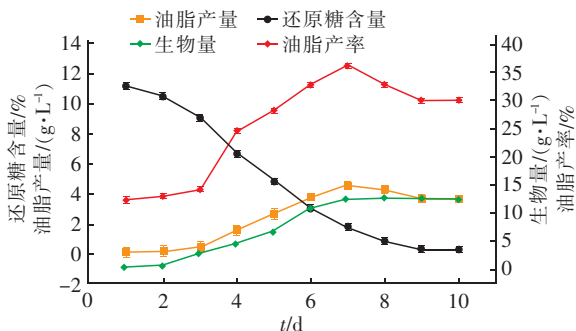


图2 *S. cerevisiae* As2.516 产油脂特征曲线

Fig.2 Characteristic curves of oil production by *S. cerevisiae* As2.516

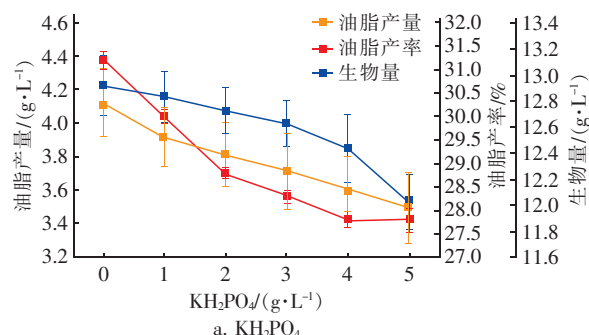
对 *S. cerevisiae* As2.516 利用餐厨垃圾水解液发酵制得的微生物油脂进行气相色谱分析,结果表明,豆蔻酸甲酯的含量为3.24%、棕榈油酸甲酯的含量为5.16%、软脂酸甲酯的含量为15.79%、亚油酸甲酯的含量为10.92%、油酸甲酯的含量为56.04%、硬脂酸甲酯的含量为8.85%。可见,发酵所得脂肪酸主要由C16和C18脂肪酸组成。

### 2.3 高浓度无机盐的影响

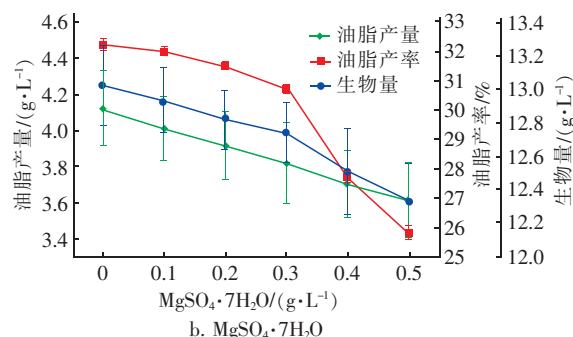
餐厨垃圾水解液中  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  等离子含量高,同时还含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等微量无机盐离子,这些离子不仅是部分产油脂菌代谢氧化还原酶反应的必要微量元素,而且其浓度也会对油脂合成速率和油脂产量产生影响<sup>[11]</sup>。餐厨垃圾水解液中金属离子浓度较高的有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ ,相应浓度分别为800~2 000、150~220、15~25、0.1~0.2、2~5 mg/L。

图3为无机离子对 *S. cerevisiae* As2.516 发酵产油脂的影响。可以看出,当发酵液中  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  浓度增加时, *S. cerevisiae* As2.516 菌体的油脂产率、油脂产量均受到抑制。向培养液中添加  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  后, *S. cerevisiae* As2.516 油脂产率下降明显,随着  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  的浓度增加,油脂产量和生物量也受到抑制;添加  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  以后, *S. cerevisiae* As2.516 菌体的油脂产率和生物量随着  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的浓度升高而降低;添加1 mg/L以下的  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  时,对 *S. cerevisiae* As2.516 的油脂产率影响较小,但当投加量大于1 mg/L时,油脂产率开始下降,油脂产量和生物量持续下降;添加0~0.1 mg/L的  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  时, *S.*

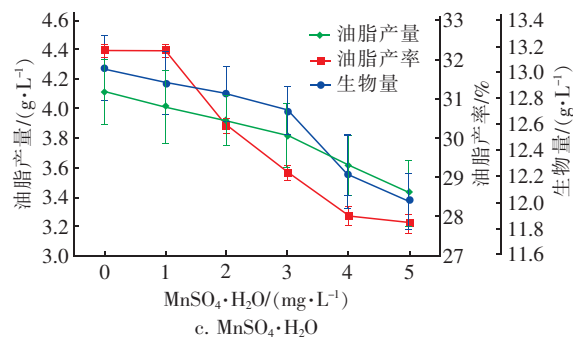
*cerevisiae* As2.516 菌体的油脂产率和油脂产量均增加,继续增加  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  时,油脂产率、油脂产量随之降低,对菌体生物量产生了抑制作用。



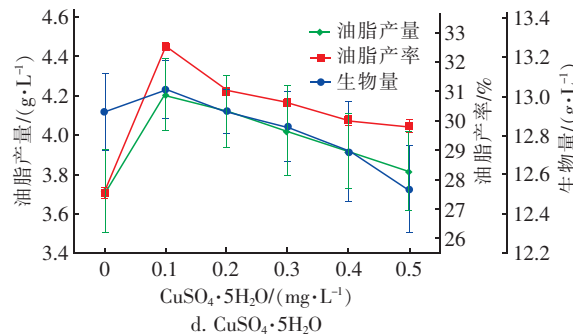
a.  $\text{KH}_2\text{PO}_4$



b.  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$



c.  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$



d.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

图3 无机离子对 *S. cerevisiae* As2.516 发酵产油脂的影响

Fig.3 Effects of inorganic ions on oil production by *S. cerevisiae* As2.516 from fermentation

### 2.4 发酵动力学模型

常用的微生物菌群生长动力学方程有 Monod 方程和 Logistic 方程。Monod 方程属于典型的均衡

动力学生长模型,适于单一限制生长性基质。Logistic 方程属于典型的 S 型曲线动力学生长模型,适应性较广泛,且可对发酵过程中菌体浓度抑制自身生长进行描述<sup>[7,12]</sup>。经综合比较以后,本研究采用 Logistic 方程建立 *S. cerevisiae* As2.516 生长动力学模型,见式(1)。

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \left(1 - \frac{X}{X_m}\right) X \quad (1)$$

式中:  $\frac{dX}{dt}$  为菌体生长速率,  $\text{mg}/(\text{mL} \cdot \text{d})$ ;  $\mu_m$  为最大比生长速率,  $\text{d}^{-1}$ ;  $t$  为发酵时间,  $\text{d}$ ;  $X$  为菌体浓度,  $\text{mg}/\text{mL}$ ;  $X_m$  为最大菌体浓度,  $\text{mg}/\text{mL}$ 。

*S. cerevisiae* As2.516 发酵产油脂过程较复杂,通过对比分析,本研究采用 Luedeking-Piret 方程建立 *S. cerevisiae* As2.516 产油脂动力学模型<sup>[13-15]</sup>,见式(2)。

$$\frac{dP}{dt} = \alpha \frac{dX}{dt} + \beta X \quad (2)$$

式中:  $\frac{dP}{dt}$  为油脂合成速率,  $\text{mg}/(\text{mL} \cdot \text{d})$ ;  $\alpha$  为生长耦联产物合成系数;  $\beta$  为非生长耦联产物合成系数。

依据物料平衡可知,在 *S. cerevisiae* As2.516 产油脂过程中消耗的还原糖主要被用于菌体繁殖生长、维持菌体生命代谢和油脂合成。因此,本研究采用 Luedeking-Piret-like 方程建立 *S. cerevisiae* As2.516 在产油脂过程中糖代谢的动力学模型,见式(3)。

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{K_{x/s}} \frac{dX}{dt} + mX + \frac{1}{K_{p/s}} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

式中:  $-\frac{dS}{dt}$  为还原糖的消耗速率,  $\text{mg}/(\text{mL} \cdot \text{d})$ ;  $\frac{1}{K_{x/s}}$  为菌体生长与还原糖消耗的相关系数;  $m$  为维持自身代谢和底物消耗的相关系数;  $\frac{1}{K_{p/s}}$  为油脂合成与底物消耗的相关系数。

经计算,本研究中发酵动力学模型方程拟合参数  $\mu_m$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $1/K_{x/s}$ 、 $m$ 、 $1/K_{p/s}$  分别为 1.042  $\text{d}^{-1}$ 、0.298、0.004、0.479、0.035、0.106。

本研究中, *S. cerevisiae* As2.516 进行餐厨垃圾水解液发酵产油脂的动力学方程见式(4)~(6)。

菌体生长动力学模型:

$$\frac{dX}{dt} = 1.042X \left(1 - \frac{X}{13.05}\right) \quad (4)$$

油脂生成动力学模型:

$$\frac{dP}{dt} = 0.298 \frac{dX}{dt} + 0.004X \quad (5)$$

还原糖消耗动力学模型:

$$-\frac{dS}{dt} = 0.479 \frac{dX}{dt} + 0.035X + 0.106 \frac{dP}{dt} \quad (6)$$

## 2.5 动力学拟合分析

图4为 *S. cerevisiae* As2.516 发酵产油脂动力学模型方程的拟合曲线。从图4可以看出, *S. cerevisiae* As2.516 菌体的生长曲线、产油脂和还原糖代谢方程的拟合值与实验值较吻合,拟合相关系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.978、0.960 和 0.996。3 个模型参数经  $F$  检验均具有显著性差异 ( $P < 0.001$ ), 且模型 99% 的概率水平是显著的。

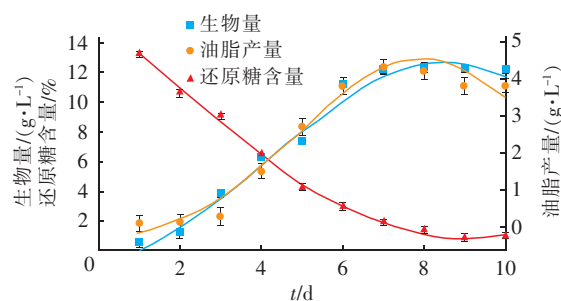


图4 *S. cerevisiae* As2.516 发酵产油脂动力学模型方程的拟合曲线

Fig.4 Fitting curves for the kinetic model equation of oil production from fermentation by *S. cerevisiae* As2.516

## 3 结论

① 餐厨垃圾水解液可被 *S. cerevisiae* As2.516 发酵产生油脂。其产油脂最优条件是 pH 值为 6、温度为 30  $^{\circ}\text{C}$  和生物接种量为 10%, 在此实验条件下油脂最高产量为 4.6 g/L、生物量为 13 g/L、油脂产率为 36.1%。油脂主要由 C16 和 C18 脂肪酸组成, 可作为制备生物柴油的原材料。*S. cerevisiae* As2.516 利用餐厨垃圾水解液发酵产油脂过程受水解液中无机盐离子的影响, 外加  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  对菌体生长和油脂产率产生抑制, 但添加微量  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  对油脂产率有促进作用。

② *S. cerevisiae* As2.516 生长曲线属于典型的 S 型增长曲线。基于 Logistic 生长动力学模型与 Luedeking-Piret 产物生成动力学模型建立的菌体

生长、产油脂和还原糖代谢的动力学模型,可以较好地描述 *S. cerevisiae* As2.516 利用餐厨垃圾水解液发酵过程。

### 参考文献:

- [1] 丁声俊. 国外生物柴油的发展状况、政策及趋势[J]. 中国油脂, 2010, 35(7): 1-4.  
DING Shengjun. Development status, policy and trend of overseas biodiesel[J]. China Oils and Fats, 2010, 35(7): 1-4 (in Chinese).
- [2] 周谦. 餐厨垃圾水解液基质培养酿酒酵母发酵产油脂[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.  
ZHOU Qian. *Saccharomyces cerevisiae* Fermentation with Food Waste Hydrolysate Substrate to Produce Microbial Oil[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014 (in Chinese).
- [3] ZHANG C S, SU H J, BAEYENS J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38(5): 383-392.
- [4] LEVIS J W, BARLAZ M A, THEMELIS N J, et al. Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada[J]. Waste Management, 2010, 30(8/9): 1486-1494.
- [5] HOEKMAN S K, BROCH A, ROBBINS C, et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 143-169.
- [6] 孙士权, 周谦, 蒋昌波, 等. 餐厨垃圾发酵产油脂的复合酶制剂水解试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(1): 99-103.  
SUN Shiquan, ZHOU Qian, JIANG Changbo, et al. Test conditions of enzymatic hydrolysis of kitchen garbage for microbial oils production[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(1): 99-103 (in Chinese).
- [7] 孙士权, 蒋昌波, 周谦, 等. 餐厨垃圾水解液分批培养酿酒酵母产油脂动力学模型的建立[J]. 现代食品科技, 2014, 30(8): 163-168, 130.  
SUN Shiquan, JIANG Changbo, ZHOU Qian, et al. Construction of kinetics model for production of microbial oils by *Saccharomyces cerevisiae* As2.516 fermentation process using hydrolysis liquid of kitchen garbage[J]. Modern Food Science & Technology, 2014, 30(8): 163-168, 130 (in Chinese).
- [8] 孙士权, 蒋昌波, 周谦, 等. 餐厨垃圾水解液培养酿酒酵母发酵产油脂的影响因素[J]. 现代食品科技, 2014, 30(11): 156-162.  
SUN Shiquan, JIANG Changbo, ZHOU Qian, et al. Factors influencing microbial oil production from food waste hydrolysates by fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* As2.516[J]. Modern Food Science & Technology, 2014, 30(11): 156-162 (in Chinese).
- [9] SHARMA Y C, SINGH B, UPADHYAY S N. Advancements in development and characterization of biodiesel: a review[J]. Fuel, 2008, 87(12): 2355-2373.
- [10] YANG S F, PHAN H V, BUSTAMANTE H, et al. Effects of shearing on biogas production and microbial community structure during anaerobic digestion with recuperative thickening[J]. Bioresource Technology, 2017, 234: 439-447.
- [11] HAN W, YE M, ZHU A J, et al. Batch dark fermentation from enzymatic hydrolyzed food waste for hydrogen production[J]. Bioresource Technology, 2015, 191: 24-29.
- [12] ZHU Z, SUN L F, HUANG X L, et al. Comparison of the kinetics of lipopeptide production by *Bacillus amyloliquefaciens* XZ-173 in solid-state fermentation under isothermal and non-isothermal conditions[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2014, 30(5): 1615-1623.
- [13] ALTIOK D, TOKATLI F, HARSA S. Kinetic modelling of lactic acid production from whey by *Lactobacillus casei* (NRRL B-441)[J]. Chemical Technology and Biotechnology, 2006, 81: 1190-1197.
- [14] GADEN E L. Fermentation process kinetics[J]. Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering, 1959, 1(4): 413-429.
- [15] LUEDEKING R, PIRET E L. A kinetic study of the lactic acid fermentation; batch process at controlled pH[J]. Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering, 1959, 1(4): 393-412.

作者简介: 曾小康(1994-), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为餐厨垃圾资源化、水环境污染治理与修复。

E-mail: 519737659@qq.com

收稿日期: 2020-08-20

修回日期: 2020-11-21

(编辑: 任莹莹)