

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.030

三七渣发酵生产蛋白饲料的总糖和淀粉降解动力学*

谭显东 王君君 段娅宁 羊依金 刘建英

(成都信息工程学院资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 在黑曲霉/产朊假丝酵母固态发酵三七渣生产蛋白饲料过程中, 考察了总糖含量、淀粉含量、还原糖含量、产品收率和 pH 值随时间的变化, 并建立了总糖和淀粉降解动力学模型。研究表明, 总糖和淀粉的降解动力学适合采用四参数对数模型进行描述, 该模型能准确预测发酵过程中总糖和淀粉含量的变化情况。在发酵过程中总糖和淀粉的半衰期分别为 58.32 h 和 42.47 h, 其降解速率分别在发酵后 46.1 h 和 29.1 h 到达峰值。总糖和淀粉在快速降解阶段的平均降解速率是其慢速降解阶段的平均降解速率的 2 倍以上。在快速降解阶段, 淀粉的平均降解速率大于总糖的平均降解速率, 但在慢速降解阶段则相反。

关键词: 三七 发酵 蛋白饲料 降解动力学

中图分类号: X705; S816.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0157-05

Dynamics of Total Sugar and Starch Degradation in Protein Feed Fermentation Production Using *Panax Notoginseng* Residues

Tan Xiandong Wang Junjun Duan Yaning Yang Yijin Liu Jianying

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The total sugar, starch and reducing sugar, yield and pH value change were thoroughly studied in solid state fermentation for protein feed production from *Panax notoginseng* residues. The related degradation kinetic model of total sugar and starch was established as well. The results showed a four-parameter model matched well the degradation kinetics of total sugar and starch and predicted the change of total sugar and starch contents relatively accurately. The half-life of total sugar and starch were determined as 58.32 h and 42.47 h, respectively. The peaks of degradation rate were observed at 46.1 h and 29.1 h, respectively. The average degradation rates of both total sugar and starch in the fast degradation stage were twice more than those in the slow degradation stage. It was found that the average degradation rate of starch was greater than that of total sugar in the fast degradation stage, but oppositely less in the slow degradation stage.

Key words: *Panax notoginseng* Fermentation Protein feed Degradation dynamics

引言

三七是一种名贵中药材, 中成药厂对其主要成分的利用集中在皂苷上, 提取总皂苷后的药渣通常作为废物抛弃, 既浪费了大量资源, 又容易造成二次污染。三七渣中含有大量的淀粉、三七多糖、氨基酸以及丰富的微量元素等营养组分, 通过固态发酵技术将其转化为蛋白饲料, 在消除环境污染的同时还能给畜牧养殖业提供一种新型保健饲料^[1]。已有

的研究工作主要关于三七渣培养基制备条件的优化^[2-3], 对相关体系发酵动力学的研究还未见报道。本文进行三七渣固态发酵生产蛋白饲料的总糖和淀粉降解动力学研究。

1 实验材料和方法

1.1 菌种

本实验所用的产朊假丝酵母 (*Candida utilis* 2.281) 由四川大学建筑与环境学院保藏和提供; 黑

收稿日期: 2012-08-27 修回日期: 2012-10-10

* 四川省科技支撑计划资助项目(2008sz0129)

作者简介: 谭显东, 副教授, 博士, 主要从事三废处理及资源化研究, E-mail: jacktxd@sina.com

曲霉 (*Aspergillus niger* sp.) 由山东农业大学生命科学学院保藏和提供。

1.2 培养基

PDA 培养基: 马铃薯浸取液 1.0 L, 葡萄糖 20.0 g, 琼脂 15.0 g, pH 值自然, 121℃ 灭菌 30 min, 用于黑曲霉的培养。

土豆汁液体培养基: 马铃薯浸取液 1.0 L, 葡萄糖 20.0 g, pH 值自然, 121℃ 灭菌 30 min, 用于产朊假丝酵母的培养。

固态发酵培养基: 在 10.0 g 三七渣中加入 0.50 g 硫酸铵, 培养基含水率 70%, 121℃ 灭菌 30 min, 用于总糖和淀粉降解动力学实验。

1.3 三七渣

三七渣由四川省某中成药厂提供, 湿物料经自然晾晒风干后于 60℃ 干燥 72 h, 粉碎、过 60 目筛后置于干燥器中备用。本次实验所用药渣中各主要成分质量分数如下: 粗蛋白 12.28%, 淀粉 33.13%, 真蛋白 9.97%。

1.4 实验方法

1.4.1 种子液的制备

黑曲霉采用 PDA 平板培养基在 30℃ 下于电热恒温恒湿培养箱内培养 3.5 d 后刮下, 将其制成菌体浓度为 2×10^7 个/mL 的孢子悬液; 产朊假丝酵母采用土豆汁液体培养基在 30℃ 下于电热恒温培养箱内培养 18 h, 制成菌体浓度为 2×10^7 个/mL 的菌悬液。

1.4.2 总糖和淀粉降解动力学实验

取 126 个容量为 250 mL 的锥形瓶, 每个锥形瓶中装入含 10.0 g 干三七渣的固态发酵培养基, 将其在 121℃ 灭菌 30 min, 冷却后同步接入 1.0 mL 黑曲霉孢子悬液和 1.0 mL 产朊假丝酵母菌悬液, 然后在 30℃ 条件下进行恒温培养, 培养时间为 10 d。实验开始后, 每隔 12 h (含初始时刻) 取出 6 个锥形瓶进行相关参数的分析测试: 从其中 3 个锥形瓶中分别取出 1.0 g 发酵培养物湿物料作为平行样用于 pH 值的测试, 然后将这 3 个锥形瓶中剩余的发酵培养物在 80℃ 条件下干燥至质量恒定后作为平行样用于淀粉含量的测试; 另外 3 个锥形瓶中的发酵培养物在 80℃ 条件下干燥至质量恒定后作为平行样用于产品收率的计算、还原糖和总糖含量的测试。

本文中所有实验数据都是 3 个平行样的平均值。

1.4.3 分析和计算方法

(1) 样品预处理: 将干燥后的发酵培养物样品粉碎, 过 40 目筛后用于还原糖、总糖和淀粉的测定。

(2) 还原糖、总糖的测定: 采用 3,5-二硝基水杨

酸法^[4]。

(3) 淀粉的测定: 采用酸水解法^[5]。

(4) pH 值测定: 称取 1.0 g 发酵培养物湿物料连同 50 mL 蒸馏水一起放入烧杯中, 用磁力搅拌器搅拌 5 min, 然后静置 20 min, 采用雷磁牌 pH3-3c 型精密 pH 计 (上海精密科学仪器有限公司) 测定其上清液的 pH 值。

(5) 产品收率的计算公式为

$$\xi = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$

式中 m_0 ——初始时刻发酵底物 (干基) 的质量, g

m_1 —— t 时刻发酵培养物 (干基) 的质量, g

1.5 数学模型的建立

首先采用 origin 8.0 软件内置标准曲线模型中的指数模型和四参数对数模型对动力学实验数据进行非线性拟合, 并通过反映拟合度优劣的统计参数对这两种数学模型的拟合度进行比较, 然后从中选择拟合度较好的四参数对数模型进行后续研究。四参数对数模型的具体形式为

$$C = \frac{C_1 - C_2}{1 + \left(\frac{t}{t_{50\%}}\right)^q} + C_2 \quad (1)$$

式中 C —— t 时刻发酵培养物 (干基, 以下相同) 中总糖 (或淀粉) 质量分数, %

t ——发酵时间, h

C_1 ——发酵期初底物中总糖 (或淀粉) 质量分数, %

C_2 ——发酵期末发酵培养物中残留的总糖 (或淀粉) 质量分数, %

$t_{50\%}$ ——总糖 (或淀粉) 质量分数从 C_1 降低到 C_2 过程中, 距离为 50% (C_1 和 C_2 间的距离用百分数表示) 时所需时间 (可视为以 C_2 为基准的半衰期), h

q ——常数

2 结果与讨论

2.1 发酵过程的动态分析

2.1.1 总糖、还原糖含量及产品收率

总糖、还原糖含量及产品收率随时间的变化如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 发酵 48 h 时是还原糖生成速率与消耗速率相互平衡的临界点, 此时还原糖含量达到整个发酵周期的峰值。在 48 h 以前, 由于体系中生物量较少, 随着淀粉的大量水解, 还原糖的生成速率大于消耗速率, 导致发酵体系中还原糖含量逐渐升高。48 h 后还原糖含量逐渐降低的原因主要有

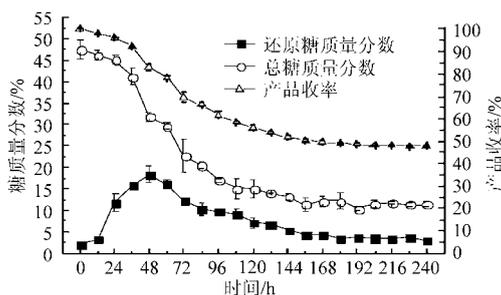


图 1 总糖、还原糖含量及产品收率的动态变化曲线

Fig. 1 Time courses of reducing sugar, total sugar contents and product yield

两个方面:其一,高浓度的还原糖对淀粉酶的合成产生了阻遏效应,影响了还原糖的产量;其二,由于生物量的增多导致还原糖的消耗速率增大。采用根霉发酵生木薯渣^[6]时在发酵初期也观察到了类似的葡萄糖累积现象,而在产朊假丝酵母发酵苹果渣^[7]的过程中却没有观察到还原糖的累积现象,其含量持续降低,这与该发酵体系中没有霉菌,缺乏多糖水解酶有关。由图 1 还可以看出,在发酵 0~120 h 期间总糖降解速率(13.24%/d)大于产品收率下降速率(8.18%/d)。说明在这段时间内被降解的总糖中有一部分被彻底氧化分解用来提供维持微生物新陈代谢活动所需要的能量,其余部分总糖则被水解为中间代谢产物用于合成新的菌体细胞。随后,表示总糖变化趋势的曲线与表示产品收率变化趋势的曲线基本上趋于平行,说明此时反应系统中新生的菌体细胞与衰亡的菌体细胞处于动态平衡,生物量基本保持稳定^[8-10]。

2.1.2 淀粉含量

淀粉含量随时间的变化如图 2 所示。

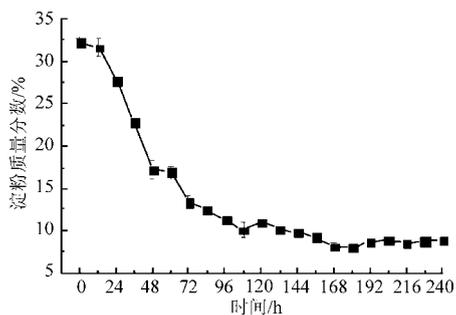


图 2 淀粉含量的动态变化曲线

Fig. 2 Time course of starch content

由图 2 可以看出,发酵培养物中淀粉含量持续下降,其变化过程经历了轻微降低、快速下降、慢速下降和保持稳定 4 个阶段。由于三七在制药过程中经历了高温水煮以及蒸汽处理,使得药渣中的淀粉已经实现了糊化。因此,作为发酵基质,三七渣很容易被微生物水解和利用,总体上其水解速率较快,但是对于纤维素类基质^[11-13]其水解过程就要缓慢很多,甚

至还会出现发酵后粗纤维含量升高的现象^[14]。

2.1.3 pH 值

发酵过程中 pH 值随时间的变化如图 3 所示。

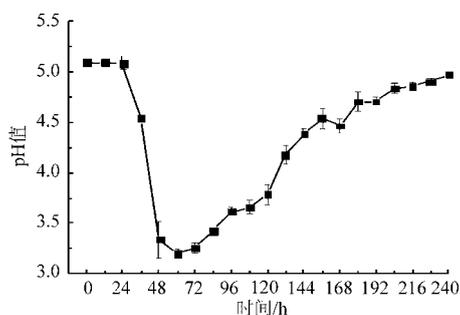


图 3 pH 值的动态变化曲线

Fig. 3 Time course of pH value

由图 3 可以看出,发酵培养物 pH 值的变化可以分为 3 个阶段。第 1 阶段:0~24 h, pH 值稳定期。微生物新陈代谢活动比较弱,代谢产物比较少,所以体系的 pH 值几乎没有变化。第 2 阶段:24~60 h, pH 值下降期。特别是在 24~48 h 期间, pH 值几乎垂直下降。由于糖类代谢产生了大量的小分子有机酸,使得发酵 60 h 后系统 pH 值达到最低值 3.2。此外,发酵系统采用生理酸性的无机氮源硫酸铵,在 NH_4^+ 被大量吸收利用后也会导致体系 pH 值快速下降^[15]。第 3 阶段:60~240 h, pH 值回升期。pH 值回升的原因可能有:该阶段微生物大量消耗前期分解产生的有机酸用于合成菌体,从而使得有机酸浓度降低, pH 值回升;发酵后期可利用的碳源不足,微生物利用有机氮源作为碳源,导致 pH 值升高^[16];发酵后期由于菌体自溶引起核酸类物质外泄,也是 pH 值回升的一个重要原因。比较图 1 和图 3 可以发现:在 pH 值下降很快的 24~48 h 期间,总糖含量下降也非常迅速,还原糖浓度则迅速上升;此后,体系中糖类物质含量变化趋缓,相应的 pH 值变化速度也逐渐变小。

2.2 总糖和淀粉降解动力学模型

目前的研究工作中普遍采用一级反应动力学来描述有机物的好氧降解过程^[17]。对于多糖类物质而言,已发表的文献中主要采用了指数模型对其降解过程进行拟合^[18-20],也有研究人员采用四参数对数模型对有机物的生物降解过程进行描述^[21]。为了获得最优的动力学方程,本文首先采用 origin 8.0 软件中自带的指数模型和四参数对数模型对图 1 和图 2 中的相关实验数据进行非线性拟合,并对其拟合度进行比较,从中选择较优的模型用于后续研究工作。本文采用的两种动力学模型的拟合度检验结果如表 1 所示,表中 R_0 表示总糖(或淀粉)的降解速率常数。

表1 指数模型和四参数对数模型的拟合度比较

Tab.1 Comparison of goodness of fit between exponential model and logistic model with four parameters

模型	总糖			淀粉		
	调整的 卡方值	调整的 决定系数	残差 平方和	调整的 卡方值	调整的 决定系数	残差 平方和
指数模型 $C = (C_1 - C_2)e^{R_0t} + C_2$	7.263 0	0.957 8	130.70	1.724 0	0.971 9	31.040
四参数对数模型 $C = \frac{C_1 - C_2}{1 + \left(\frac{t}{t_{50\%}}\right)^q} + C_2$	0.825 5	0.995 2	14.03	0.418 6	0.993 2	7.117

由表1可以看出,就3个反映模型拟合度的统计参数(调整的卡方值、调整的决定系数和残差平方和)而言,无论是总糖还是淀粉,其降解动力学过程采用四参数对数模型进行描述都更好一些。因此,本文决定选择四参数对数模型来进行总糖和淀粉的降解动力学模型研究,拟合曲线和相关统计参数分别见图4、图5和表2。

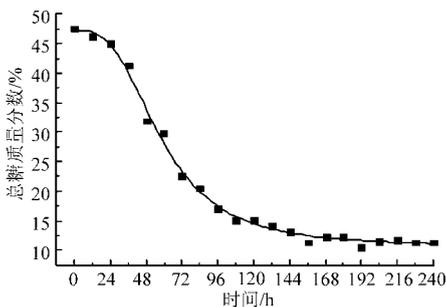


图4 总糖含量的动态变化拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of time course of total sugar content

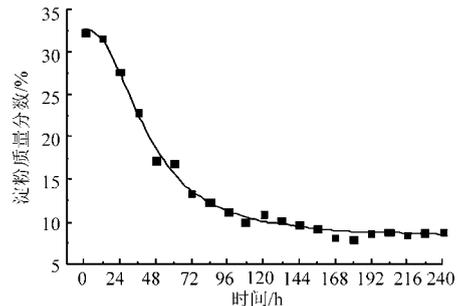


图5 淀粉含量的动态变化拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of time course of starch content

由表2和图4、图5可以看出,采用四参数对数模型能很好地拟合总糖和淀粉降解过程,符合统计检验的要求。相应的总糖降解动力学模型为

$$C = \frac{36.75}{1 + \left(\frac{t}{58.32}\right)^{2.941}} + 10.56 \quad (2)$$

表2 总糖和淀粉降解动力学模型参数

Tab.2 Dynamics model parameters of total sugar and starch degradation

	模型参数				统计参数				
	C_1	C_2	$t_{50\%}$	q	调整的卡方值	调整的决定系数	残差平方和	F	p
总糖	47.31	10.56	58.32	2.941	0.825 5	0.995 2	14.03	3 985	0
淀粉	32.62	8.095	42.47	2.327	0.418 6	0.993 2	7.117	3 221	0

淀粉降解动力学模型为

$$C = \frac{24.525}{1 + \left(\frac{t}{42.47}\right)^{2.327}} + 10.56 \quad (3)$$

为了进一步了解发酵过程中总糖和淀粉降解速率随时间变化的规律,由式(1)可以推出

$$t_n = t_{50\%} \left(\frac{1}{1-n} - 1 \right)^{\frac{1}{q}} \quad (4)$$

式中 t_n ——整个发酵周期内总糖(或淀粉)含量从 C_1 下降到 C_2 间,变化任一距离百分数(n)所需的时间, h

则 $t_{50\%} - t_{10\%}$ 表示因总糖(或淀粉)含量高而快速降解的阶段; $t_{90\%} - t_{50\%}$ 表示因总糖(或淀粉)含量减半而慢速降解的阶段; $t_{90\%} - t_{10\%}$ 表示总糖(或淀粉)由高含量向低含量转换的阶段或降解过程活跃阶段。

根据式(4)计算所得总糖(或淀粉)的相关时间参数如表3所示。

表3 总糖和淀粉降解的时间参数

Tab.3 Time parameters of total sugar and starch degradation

	h					
	$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	$t_{50\%}$	$t_{90\%} - t_{50\%}$	$t_{50\%} - t_{10\%}$	$t_{90\%} - t_{10\%}$
总糖	27.63	123.1	58.32	95.47	30.69	64.78
淀粉	16.52	109.2	42.47	92.68	25.95	66.73

由表3可以看出,无论是总糖还是淀粉,在快速降解阶段($t_{50\%} - t_{10\%}$)的平均降解速率都是在慢速降解阶段($t_{90\%} - t_{50\%}$)平均降解速率的2倍以上,两者在快速降解阶段的持续时间分别占整个降解活跃过程阶段($t_{90\%} - t_{10\%}$)持续时间的32.1%和28.0%。此外,由表2还可以看出,在快速降解阶段,

淀粉的平均降解速率大于总糖的平均降解速率,但在慢速降解阶段则相反,这与还原糖的产生、累积和消耗相关。

采用 origin 8.0 软件对图 4 和图 5 中描述总糖和淀粉含量动态变化的拟合曲线进行数值微分,可以获得总糖和淀粉降解速率随时间变化的曲线,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,总糖和淀粉降解速率的动态变化趋势一致,两者的降解速率分别在发酵后 46.1 h 和 29.1 h 到达峰值。

3 结论

(1) 总糖和淀粉的降解动力学适合采用四参数对数模型进行描述,在发酵过程中总糖和淀粉的半衰期($t_{50\%}$)分别为 58.32 h 和 42.47 h,两者的降解速率分别在发酵后 46.1 h 和 29.1 h 到达峰值。

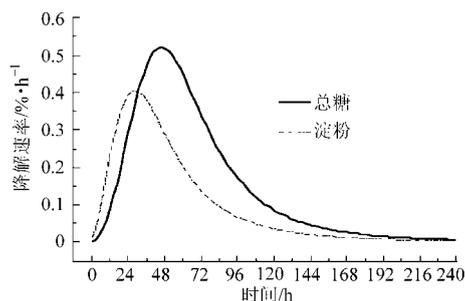


图 6 总糖和淀粉降解速率的动态变化曲线

Fig. 6 Time courses of total sugar and starch degradation rates

(2) 总糖和淀粉在快速降解阶段($t_{50\%} - t_{10\%}$)的平均降解速率是它们在慢速降解阶段($t_{90\%} - t_{50\%}$)平均降解速率的 2 倍以上。在快速降解阶段,淀粉的平均降解速率大于总糖的平均降解速率;但在慢速降解阶段则相反。

参 考 文 献

- 1 谭显东,刘凤梅,羊依金,等.一种利用三七渣发酵生产保健饲料的方法:中国,201110119291.2 [P].2011-09-21.
- 2 刘凤梅,谭显东,羊依金,等.三七渣固态发酵生产蛋白饲料[J].中国酿造,2011(2):67~70.
Liu Fengmei,Tan Xiandong,Yang Yijin,et al. Production of protein feedstuff from *notoginseng* residues by solid-state fermentation [J]. China Brewing,2011(2):67~70. (in Chinese)
- 3 段娅宁,谭显东,羊依金,等.用于蛋白富集的三七渣培养基制备条件优化[J].中国饲料,2012(7):40~42.
- 4 俞建瑛,蒋宇,王善利.生物化学实验技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- 5 GB/T 5009.9—2008 食品中淀粉的测定[S].
- 6 Soccol C R,Marin B, Raimbault M,et al. Breeding and growth of *Rhizopus* in raw cassava by solid state fermentation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,1994,41(3):330~336.
- 7 Silas Granato Villas-Bôas,Elisa Esposito,Margarida Matos de Mendonça. Bioconversion of apple pomace into a nutritionally enriched substrate by *Candida utilis* and *Pleurotus ostreatus* [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2003,19(5):461~467.
- 8 Soccol C,Leon J R,Marin B,et al. Growth kinetics of *Rhizopus arrhizus* in solid state fermentation of treated Cassava [J]. Biotechnology Techniques,1993,7(8):563~568.
- 9 Christen P,Auria R,Vega C,et al. Growth of *Candida utilis* in solid state fermentation[J]. Biotechnology Advances,1993,11(3):549~557.
- 10 Sameer Al-Asheh,Zdravko Duvnjak. Effect of glucose concentration on the biomass and phytase productions and the reduction of the phytic acid content in canola meal by *Aspergillus carbonarius* during a solid-state fermentation process [J]. Biotechnology Progress,1994,10(4):353~359.
- 11 Ragini Bisaria,Mira Madan, Padma Vasudevan. Utilisation of agro-residues as animal feed through bioconversion [J]. Bioresource Technology,1997,59(1):5~8.
- 12 Smail T,Salih O,Knapp J S. Solid-state fermentation of carob pods by *Aspergillus niger* for protein production;effect of particle size [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,1995,11(2):171~173.
- 13 Fan L,Pandey A,Mohan R,et al. Use of various coffee industry residues for the cultivation of *Pleurotus ostreatus* in solid state fermentation[J]. Acta Biotechnologica,2000,20(1):41~52.
- 14 Rajesh N,Imelda-Joseph,Paul Raj R. Value addition of vegetable wastes by solid-state fermentation using *Aspergillus niger* for use in aquafeed industry [J]. Waste Management,2010,30(11):2223~2227.
- 15 诸葛健,李华钟.微生物学[M].北京:科学出版社,2004.
- 16 Jonathan S G,Fasidi I O,Ajayi A O,et al. Biodegradation of Nigerian wood wastes by *Pleurotus tuber-regium* (Fries) Singer [J]. Bioresource Technology,2008,99(4):807~811.
- 17 Haug R T. The practical handbook of compost engineering [M]. Boca Raton, Florida:Lewis Publishers,1993.
- 18 Kulcu R,Yaldiz O. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes [J]. Bioresource Technology,2004,93(1):49~57.

回归;对于甘油,则是偏最小二乘回归模型性能较好。总体来讲,主成分回归和偏最小二乘回归都可

参 考 文 献

- 1 Di Egidio V, Sinelli N, Giovanelli G, et al. NIR and MIR spectroscopy as rapid methods to monitor red wine fermentation[J]. *European Food Research and Technology*, 2010, 230(6): 947 ~ 955.
- 2 Piñeiro Z, Natera R, Castro R, et al. Characterisation of volatile fraction of monovarietal wines; influence of winemaking practices [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 563(1 ~ 2): 165 ~ 172.
- 3 Urbancr Cuadrado M, Luque de Castro M D, Pérez Juan P M, et al. Near infrared reflectance spectroscopy and multivariate analysis in enology: determination or screening of fifteen parameters in different types of wines[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 527(1): 81 ~ 88.
- 4 Urbancr Cuadrado M, Luque de Castro M D, Pérez Juan P M, et al. Comparison and joint use of near infrared spectroscopy and Fourier transform mid infrared spectroscopy for the determination of wine parameters[J]. *Talanta*, 2005, 66(1): 214 ~ 228.
- 5 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- 6 彭帮柱, 岳田利, 袁亚宏, 等. 苹果酒发酵过程中糖度近红外光谱检测模型的建立[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 652 ~ 655.
Peng Bangzhu, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Modeling of sugar content based on NIRS during cider-making fermentation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 652 ~ 655. (in Chinese)
- 7 Cozzolino D, Kwiatkowski M J, Parker M, et al. Prediction of phenolic compounds in red wine fermentations by near infrared spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 513(1): 73 ~ 80.
- 8 Damberg R G, Kambouris A, Francis I L, et al. Rapid analysis of methanol in grape derived distillation products using near infrared transmission spectroscopy[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(11): 3 079 ~ 3 084.
- 9 严衍祿, 赵龙莲, 韩东海, 等. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- 10 陆婉珍, 袁洪福, 徐广通, 等. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 中国石油化工出版社, 2000.
- 11 Wentzell P D, Vega Montoto L. Comparison of principal components regression and partial least squares regression through generic simulations of complex mixtures[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2003, 65(2): 257 ~ 279.
- 12 Hemmateenejad B, Akhond M, Samari F. A comparative study between PCR and PLS in simultaneous spectrophotometric determination of diphenylamine, aniline, and phenol: effect of wavelength selection[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2007, 67(3 ~ 4): 958 ~ 965.

(上接第 161 页)

- 19 陈活虎, 何晶晶, 邵立明, 等. 生物质分类表征蔬菜废物高温好氧降解特征及其动力学描述[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 802 ~ 806.
Chen Huohu, He Pinjing, Shao Liming, et al. Characteristics and kinetics of aerobic thermophilic decomposing for various biomass compositions of vegetable waste[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 802 ~ 806. (in Chinese)
- 20 李坚斌, 李琳, 郭祀远, 等. 超声辐照马铃薯淀粉糊降解动力学的研究[J]. *食品科学*, 2007, 28(2): 84 ~ 87.
Li Jianbin, Li Lin, Guo Siyuan, et al. Degradation kinetics of potato starch paste under ultrasonic irradiation[J]. *Food Science*, 2007, 28(2): 84 ~ 87. (in Chinese)
- 21 赵叶君, 张巧巧, 杨超光, 等. 河流湿地土壤芘的降解和生物有效性模型与酶活性动态变化[J]. *生态毒理学报*, 2010, 5(5): 647 ~ 656.
Zhao Yejun, Zhang Qiaoqiao, Yang Chaoguang, et al. Model of pyrene degradation and bioavailability and dynamic changes of enzymatic activities in the riverine wetland soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, 5(5): 647 ~ 656. (in Chinese)