

超声波降解苹果汁中展青霉素动力学研究*

高振鹏 刘 瑞 张德举 袁亚宏 岳田利

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了掌握超声波降解苹果汁中展青霉素的动力学特性,在前期超声波降解苹果汁中展青霉素的研究基础上,利用拟一级反应动力学方程对超声波影响因素中超声波功率、频率及温度降解苹果汁中展青霉素的试验数据进行拟合,确定相关参数,进一步建立各影响因素降解速率常数与相关影响因子之间的关系方程。结果表明:超声波功率对苹果汁中展青霉素的降解符合拟一级反应方程,超声波功率为 490 W 时,降解率最大;功率降解速率常数 k_p 与超声波功率的方程为 $k_p = 6 \times 10^{-5} P - 0.0117$ 。超声波频率对展青霉素的降解符合拟一级反应方程,超声波频率为 45 kHz 时,降解率最大;频率降解速率常数 k_f 与超声波频率 f 的关系方程为 $k_f = -8 \times 10^{-4} f^2 + 0.1119f - 2.5126$ 。温度对苹果汁中展青霉素的降解符合拟一级反应方程,温度为 30℃ 时,降解率最大;温度降解速率常数 k_T 与温度 T 的关系方程为 $k_T = -1 \times 10^{-4} T^2 + 0.0061T - 0.0769$ 。

关键词: 苹果汁 展青霉素 超声波 降解 动力学

中图分类号: TS201.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0230-06

Kinetics Study of Ultrasonic Degradation of Patulin in Apple Juice

Gao Zhenpeng Liu Rui Zhang Deju Yuan Yahong Yue Tianli

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: China is the biggest apple juice concentrate producer in the world, while some security problems, especially patulin still occur in apple juice concentrate industry. These problems are obstacle to produce high quality apple juice concentrate in China. In order to reduce the content of patulin and improve the safety of apple juice, the kinetics of ultrasonic degradation of patulin in apple juice was studied. The pseudo-first order kinetics models were established to investigate the effect of ultrasonic power, frequency and temperature on the degradation of patulin. The results showed that the ultrasonic power was coincided with the pseudo-first order kinetics models in patulin degradation process. The biggest degradation rate was obtained at a power of 490 W. The power degradation constant k_p value increased with the enhancing power. The power degradation constant k_p and the ultrasonic power P was $k_p = 6 \times 10^{-5} P - 0.0117$. The ultrasonic frequencies were consistent with the pseudo-first order kinetics models in patulin degradation process. The results indicated that 45 kHz was the optimal frequency. The frequencies degradation constant k_f and the ultrasonic frequencies f was $k_f = -8 \times 10^{-4} f^2 + 0.1119f - 2.5126$. The temperature was coincided with the pseudo-first order kinetics models in patulin degradation process. The results suggested that 30℃ was the optimal temperature. The temperature degradation constant k_T and the temperature T was $k_T = -1 \times 10^{-4} T^2 + 0.0061T - 0.0769$. The study of patulin degradation kinetics will resolve the pollution problem of patulin and provide the theoretical basis for industry controlling of patulin in the producing of cloudy apple juice and apple jam.

Key words: Apple juice Patulin Ultrasonic Degradation Kinetics

收稿日期: 2015-07-09 修回日期: 2015-08-20

* 陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2015KTCL02-02)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD31B01)

作者简介: 高振鹏,副教授,主要从事食品加工及安全控制研究,E-mail: gzp5988@163.com

通讯作者: 岳田利,教授,博士生导师,主要从事食品生物技术及食品安全控制研究,E-mail: yuetl@nwsuaf.edu.cn

引言

展青霉素是真菌的次级代谢产物,具有致癌、致畸和致突变等毒副作用^[1-2],广泛存在于水果及其制品中^[3]。水果制品中展青霉素问题已成为影响我国果品质量安全的主要问题^[4-6]。

目前,在苹果加工产品中,苹果清汁中的展青霉素可利用活性炭、树脂吸附手段去除^[7-8],而果酱及浊汁产品中含有的展青霉素不能利用吸附手段去除,只能采用物理和生物降解的手段。展青霉素的物理降解方法包括超声波、微波、 γ 射线辐照和脉冲光处理等^[9-12],生物方法则主要利用酵母和乳酸菌发酵对展青霉素进行降解^[13-14]。在上述降解方法中,微波处理产生大量热量,易破坏产品中含有的营养成分,且工业化应用难度较大; γ 射线辐照处理局限性较大,无法大规模实施;脉冲光照射对于流动性、透光性能良好的果蔬清汁效果明显,对于流动性较差、透光性能不好的浊汁及果酱产品效果较差;生物方法通过发酵降解展青霉素,然而发酵过程改变了原产品的性状。比较发现,超声波技术属于非热加工技术,在作用过程中产生空化、机械等多重效应,能对有害物质进行降解^[15-16],并且易于实现工业化,因此,选用能易于工业化的超声波作为果酱及浊汁产品中展青霉素降解的技术手段,并且已有将超声波技术用于苹果汁中展青霉素降解的研究^[9]。

资料检索未发现超声波降解果蔬制品中展青霉素动力学方面的研究报道,因此,本文在前期研究的基础上,进一步揭示超声波功率、频率及温度等相关因素降解苹果汁中展青霉素的拟一级动力学关系,旨在为利用超声波技术降解苹果浊汁及苹果酱中展青霉素的工业化应用及预测模型构建提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

苹果汁,陕西海升果业发展股份有限公司提供。

1.2 试剂

展青霉素(色谱纯,美国 Sigma - Aldrich 公司)、乙酸乙酯、无水 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 、 HCl 、 NaOH 、乙醇、乙酸(以上试剂均为分析纯,西安化学试剂厂)。

1.3 主要仪器与设备

旋转蒸发器(RE - 5205 型,上海亚荣生化仪器厂)、超声波清洗器(KQ - 700VDV 型,昆山市仪器设备有限公司)、分析天平(AUY220 型,日本岛津公司)、高效液相色谱仪(LC - 20AD 型,日本岛津公司)。

1.4 试验方法

1.4.1 含展青霉素果汁制备

将 70° Brix 苹果浓缩汁用蒸馏水稀释至 12°Brix。用移液管量取 100 mg/L 的展青霉素标准溶液 10 mL 于 50 mL 棕色容量瓶中,再用 12°Brix 苹果汁定容,即得到展青霉素质量浓度为 20 mg/L 的苹果汁,并于 4℃ 冰箱保存。试验时,用移液管量取上述苹果汁 5 mL 于 1 000 mL 容量瓶中,再用 12°Brix 苹果汁定容至刻度,摇匀即得到含有 100 $\mu\text{g/L}$ 展青霉素的苹果汁。并用高效液相色谱法进一步确定苹果汁中展青霉素质量浓度。

1.4.2 展青霉素提取与测定

展青霉素的提取:取 10 mL 超声波处理后的苹果汁,倒入分液漏斗中,加入 20 mL 乙酸乙酯,振荡 1 min,静置分层后,取下层果汁,再重复提取 2 次,合并上层 60 mL 乙酸乙酯,再转入分液漏斗中,加入 4 mL 饱和 Na_2CO_3 溶液振荡 30 s,静置后取上层乙酸乙酯,用 15 g 无水 Na_2SO_4 过滤。在 40℃ 条件下,用旋转蒸发仪蒸干,再用 1 mL 酸化水冲洗瓶中展青霉素,移入离心管中,用 0.22 μm 滤纸过滤,待测。

展青霉素的测定:高效液相色谱法(AOAC 2000.02)测定。色谱条件:VP - ODS 色谱柱(柱径 4.6 mm;柱长 250 mm),紫外检测器(检测波长 276 nm),流动相为乙腈水溶液(乙腈与水体积比为 1:9),流速 1.0 mL/min,柱温 30℃,进样量 20 μL 。

1.4.3 超声波功率对展青霉素降解动力学试验

分别向 4 个 250 mL 锥形瓶中加入已知展青霉素质量浓度的苹果汁溶液 150 mL,固定温度 30℃、超声波频率 45 kHz,4 个锥形瓶分置在 280、350、420、490 W 功率下进行超声波处理,分别于 10、20、30、40、50、60 min 时取样,测定苹果汁中的展青霉素含量。利用拟一级反应方程对试验数据进行拟合处理。所有分析数据均采用 3 次试验结果的平均值。

1.4.4 超声波频率对展青霉素降解动力学试验

分别向 3 个 250 mL 锥形瓶中加入已知展青霉素质量浓度的苹果汁溶液 150 mL,固定温度 30℃、超声波功率 490 W,3 个锥形瓶分置在 28、45、100 kHz 频率下进行超声波处理,分别于 10、20、30、40、50、60 min 时取样,测定苹果汁中的展青霉素含量。利用拟一级反应方程对试验数据进行拟合处理。所有分析数据均采用 3 次试验结果的平均值。

1.4.5 温度对展青霉素降解动力学试验

分别向 3 个 250 mL 锥形瓶中加入已知展青霉素质量浓度的苹果汁溶液 150 mL,固定超声波频率 45 kHz、超声波功率 490 W,3 个锥形瓶分置在 20、30、40℃ 的温度下进行超声波处理,分别于 10、20、

30、40、50、60 min 时取样,测定苹果汁中的展青霉素含量。利用拟一级反应方程对试验数据进行拟合处理。所有分析数据均采用 3 次试验结果的平均值。

1.5 展青霉素降解率计算

展青霉素降解率计算公式^[9]为

$$M = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100\%$$

式中 M ——展青霉素降解率,%
 c_0 ——果汁中展青霉素初始质量浓度, $\mu\text{g/L}$
 c ——处理后果汁中展青霉素质量浓度, $\mu\text{g/L}$

1.6 动力学方程

展青霉素降解是复杂的过程,至今没有固定的模型来描述展青霉素的降解动力学。本试验按照一般的反应速率方程推导出拟一级速率方程对其动力学过程进行描述。

反应速率方程^[17-19]表示为

$$r = -\frac{dc}{dt} = kc^n$$

式中 r ——反应速率, $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{min})$
 t ——处理时间,min
 k ——反应速率常数, min^{-1}
 n ——反应级数

当反应级数 $n=1$ 时,式(2)则为拟一级反应动力学方程,即

$$r = -\frac{dc}{dt} = kc$$

对式(3)进一步推导,变为

$$c = c_0 \exp(-kt)$$

对式(4)两边同时取对数,整理为

$$\ln c = \ln c_0 - kt$$

对式(5)进一步整理,变为

$$\ln \frac{c_0}{c} = kt$$

半衰期^[20]则可表示为

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k}$$

式中 $t_{\frac{1}{2}}$ ——降解半衰期,min

2 试验与结果分析

2.1 超声波功率对果汁中展青霉素降解动力学模型的影响

在温度 30℃,超声波频率 45 kHz,超声波功率分别为 280、350、420、490 W 条件下,检测不同超声波功率时苹果汁中展青霉素的降解效果,试验结果如图 1 所示。

由图 1 可知,其它条件不变时,随着超声波功率的增加,苹果汁中展青霉素的降解率增加。当超声

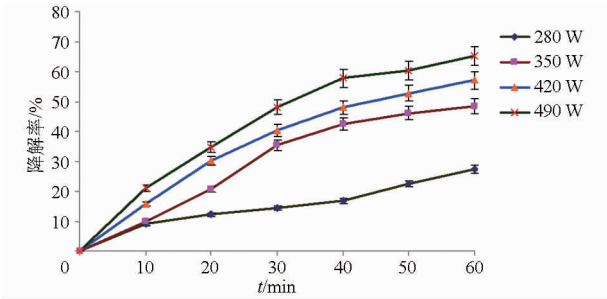


图 1 不同功率对超声波降解苹果汁中展青霉素的影响
Fig.1 Effect of different powers on ultrasonic degradation of patulin in apple juice

波功率为 490 W、处理 60 min 时,测定苹果汁中残留的展青霉素质量浓度为 34.8 $\mu\text{g/L}$,展青霉素降解率达到 65.2%;相同条件下超声波功率为 280 W 时,展青霉素降解率仅为 27.35%。

利用式(6)拟一级动力学方程拟合不同功率下展青霉素随时间的变化数据,绘制 $\ln(c_0/c)$ 与 t 的模型曲线,如图 2 所示。

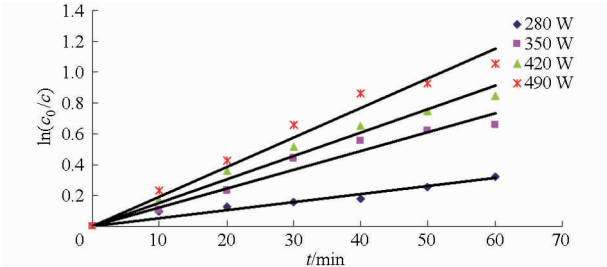


图 2 不同超声波功率时果汁中展青霉素降解的动力学曲线
Fig.2 Kinetics of different ultrasonic powers on patulin degradation in apple juice

由图 2 可知, $\ln(c_0/c)$ 与 t 具有良好的线性关系,说明超声波功率对果汁中展青霉素的降解符合拟一级反应动力学方程($R^2 > 0.95$)。通过式(6)、式(7)可以得到果汁中展青霉素在不同超声波功率条件下的降解速率常数 k_p 、半衰期 $t_{\frac{1}{2}}$ 和决定系数 R^2 ,如表 1 所示。

表 1 不同超声波功率下展青霉素降解的拟一级动力学模型参数

Tab.1 Degradation parameters of kinetics models (pseudo-first order) under different ultrasonic powers			
功率/W	k_p/min^{-1}	R^2	$t_{\frac{1}{2}}/\text{min}$
280	0.005 2	0.952 5	133. 3
350	0.012 3	0.963 1	56. 4
420	0.015 2	0.976 3	45. 6
490	0.019 2	0.968 1	36. 1

由表 1 可知,随超声波功率的增加,功率降解速率常数 k_p 呈增加趋势,半衰期 $t_{\frac{1}{2}}$ 呈现下降趋势,说明超声波功率越高,越有利于果汁中展青霉素的降

解。在超声波降解过程中,功率是控制空化泡产生数量的主要参数,功率的增加有利于空化作用的进行,从而有利于展青霉素的降解^[18,21]。

利用表 1 中拟一级降解速率方程试验数据,以功率降解速率常数 k_p 对超声波功率 P 作曲线,当超声波功率在 280 ~ 490 W 内变化时,果汁中展青霉素的功率降解速率常数 k_p 与超声波功率 P 的关系方程可表述为

$$k_p = 6 \times 10^{-5} P - 0.0117 \tag{8}$$

2.2 超声波频率对果汁中展青霉素降解动力学模型的影响

在温度 30℃,超声波功率 490 W,超声波频率分别为 28、45、100 kHz 条件下,检测不同超声波频率时苹果汁中展青霉素的降解效果,试验结果如图 3 所示。

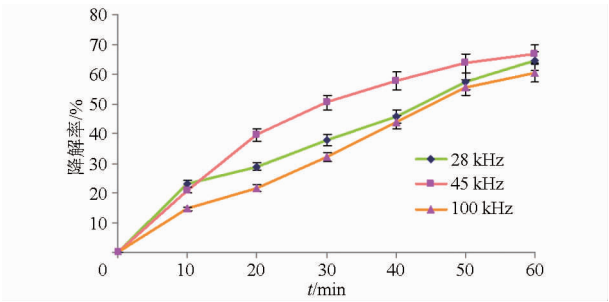


图 3 不同频率对超声波降解苹果汁中展青霉素的影响
Fig.3 Effect of different frequencies on ultrasonic degradation of patulin in apple juice

由图 3 可知,其它条件不变时,当超声波频率为 45 kHz、处理时间 60 min 时,测定得到苹果汁中残留的展青霉素质量浓度为 33.36 μg/L,展青霉素降解率达到 66.64%,相同条件下超声波频率为 100 kHz 时,展青霉素降解率为 60.56%,说明在一定的频率范围内,最适降解展青霉素的超声波频率为 45 kHz。

利用拟一级动力学方程拟合不同频率下展青霉素随时间的变化数据,绘制 $\ln(c_0/c)$ 与 t 的模型曲线,如图 4 所示。

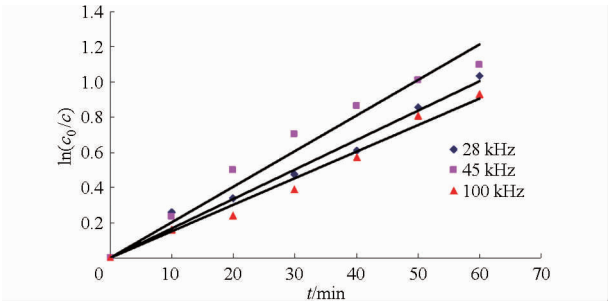


图 4 不同超声波频率时果汁中展青霉素降解的动力学曲线

Fig.4 Kinetics of different ultrasonic frequencies on patulin degradation in apple juice

由图 4 可知, $\ln(c_0/c)$ 与 t 具有良好的线性关系,说明超声波频率对果汁中展青霉素的降解符合拟一级反应动力学方程 ($R^2 > 0.96$)。通过式 (6)、式 (7) 可以得到果汁中展青霉素在不同超声波频率条件下的 k_f 、 $t_{1/2}$ 和 R^2 ,如表 2 所示。

表 2 不同超声波频率下展青霉素降解的拟一级动力学模型参数

Tab.2 Degradation parameters of kinetics models (pseudo-first order) under different ultrasonic frequencies

频率/kHz	k_f/min^{-1}	R^2	$t_{1/2}/\text{min}$
28	0.016 8	0.981 3	41. 26
45	0.020 3	0.964 0	34. 15
100	0.015 1	0.982 1	45. 90

由表 2 可知,在超声波频率 45 kHz 时,降解速率常数 k_f 最大,半衰期 $t_{1/2}$ 也最小,说明超声波频率 45 kHz 时,果汁中展青霉素的降解效果最好。主要原因在于较低超声波频率产生较大的空化泡,空化泡破灭瞬间产生更高的局部温度和压力,更有利于展青霉素的降解^[18,22]。因此,在超声波降解过程中,频率也是控制空化作用的主要参数,45 kHz 有利于空化作用的进行,从而有利于展青霉素的降解。

利用表 2 中拟一级降解速率方程试验数据,以频率降解速率常数 k_f 对超声波频率 f 作曲线,当超声波频率在 28 ~ 100 kHz 内变化时,果汁中展青霉素的频率降解速率常数 k_f 与超声波频率 f 的关系方程可表述为

$$k_f = -8 \times 10^{-4} f^2 + 0.1119 f - 2.5126 \tag{9}$$

2.3 温度对果汁中展青霉素降解动力学模型的影响

在超声波功率 490 W、频率 45 kHz,温度分别为 20、30、40℃ 条件下,测定不同温度时苹果汁中展青霉素的降解效果,试验结果如图 5 所示。

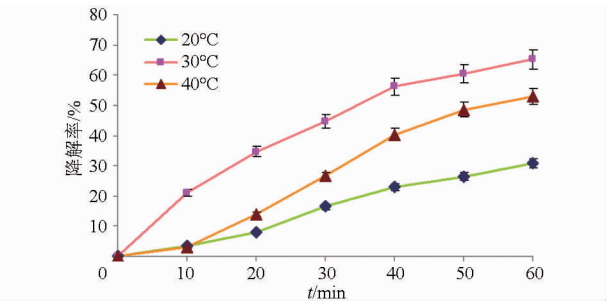


图 5 不同温度对超声波降解苹果汁中展青霉素的影响
Fig.5 Effect of different temperatures on ultrasonic degradation of patulin in apple juice

由图 5 可知,当其它条件不变时,温度为 30℃,处理时间 60 min,测定出苹果汁中残留的展青霉素质量浓度为 34.8 μg/L,展青霉素降解率达到

65.2% ;其它相同条件下温度为 20℃ 时,展青霉素降解率为 52.99% ,说明在 20 ~ 40℃ 范围内,较适的处理温度是 30℃ 。

利用拟一级动力学方程拟合不同温度下展青霉素随时间的变化规律,绘制 $\ln(c_0/c)$ 与 t 的模型曲线,如图 6 所示。

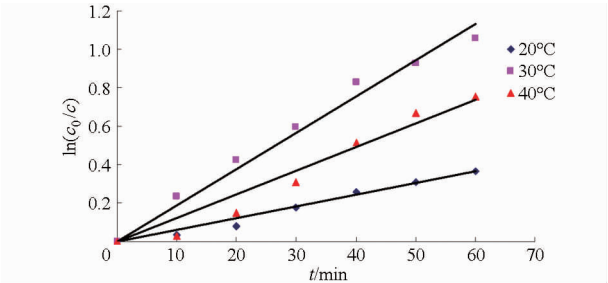


图 6 不同温度时果汁中展青霉素降解的动力学曲线
Fig.6 Kinetics of different temperatures on patulin degradation in apple juice

由图 6 可知, $\ln(c_0/c)$ 与 t 具有良好的线性关系,说明温度对果汁中展青霉素的降解符合拟一级反应动力学方程 ($R^2 > 0.95$)。通过式(6)、(7)可以得到在不同温度条件下的 k_T 、 $t_{1/2}$ 和 R^2 ,如表 3 所示。

由表 3 可知,在温度 30℃ 时,温度降解速率常数 k_T 最大,半衰期 $t_{1/2}$ 也最小,说明温度 30℃ 时,果汁中展青霉素的降解效果最好。利用表 3 中拟一级降解速率方程试验数据,以温度降解速率常数 k_T 对温度 T 作曲线,当温度在 20 ~ 40℃ 内变化时,果汁中

展青霉素的温度降解速率常数 k_T 与温度 T 的关系方程可表述为

$$k_T = -1 \times 10^{-4} T^2 + 0.006\,1 T - 0.076\,9 \quad (10)$$

表 3 不同温度展青霉素降解的拟一级动力学模型参数
Tab.3 Degradation parameters of kinetics models (pseudo-first order) under different temperatures

温度/℃	k_T/min^{-1}	R^2	$t_{1/2}/\text{min}$
20	0.006 1	0.978 7	113.63
30	0.018 8	0.981 2	36.87
40	0.012 3	0.955 5	56.35

3 结论

(1)在超声波功率 490 W 时,展青霉素的降解率最高,降解过程符合拟一级动力学方程;果汁中展青霉素的功率降解速率常数 k_P 与超声波功率 P 的关系方程为 $k_P = 6 \times 10^{-5} P - 0.011\,7$ 。

(2)在超声波频率 45 kHz 时,超声波对展青霉素的降解效果最佳,降解过程符合拟一级动力学方程;果汁中展青霉素的频率降解速率常数 k_f 与超声波频率 f 的关系方程为 $k_f = -8 \times 10^{-4} f^2 + 0.111\,9 f - 2.512\,6$ 。

(3)温度为 30℃ 时,超声波对展青霉素的降解率最高,降解过程符合拟一级动力学方程;果汁中展青霉素的温度降解速率常数 k_T 与温度 T 的关系方程为 $k_T = -1 \times 10^{-4} T^2 + 0.006\,1 T - 0.076\,9$ 。

参 考 文 献

1 Dombink-Kurtzman M A, Blackburn J A. Evaluation of several culture media for production of patulin by penicillium species[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005,98(3): 241 – 248.

2 Morales H,Marin S,Centelles X, et al. Cold and ambiennr deck storage prior to processing as a critical control point for patulin accumulation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 116(2): 260 – 265.

3 Saxena N, Ansari K M, Kumar R, et al. Patulin causes DNA damage leading to cell cycle arrest and apoptosis through modulation of Bax, P53 and P21/WAF1 proteins in skin of mice[J]. Toxicology and Applied Pharmacology,2009,234(2): 192 – 201.

4 蒋雄图,虞左向. 棒曲霉素[J]. 无锡轻工业学院学报,1989,8(2):73 – 84.

5 周克权. 展青霉素的化学检测方法[J]. 国外医学卫生学分册,2001,28(1):29 – 32.

6 Leggott N L,Vismer H F, Sydenham E W, et al. Occurrence of patulin in the commercial processing of apple juice[J]. South African Journal of Science, 2000, 96: 241 – 243.

7 Kadakal C, Nas S. Effect of activated charcoal on patulin, fumaric acid and some other properties of apple juice[J]. Nahrung-food, 2002,46:31 – 33.

8 朱振宝,易建华,寇晓康. 苹果汁中棒曲霉素的吸附动力学研究[J]. 食品科学,2006,27(6):91 – 95.

Zhu Zhenbao, Yi Jianhua, Kou Xiaokang. Study on kinetics of adsorption of patulin in apple juice[J]. Food Science, 2006, 27(6):91 – 95. (in Chinese)

9 高振鹏,岳田利,袁亚宏,等. 苹果汁中展青霉素的超声波降解[J]. 农业机械学报,2009,40(9):138 – 142.

Gao Zhenpeng, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Ultrasonic degradation of patulin in apple juice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):138 – 142. (in Chinese)

10 张小平,李元瑞,师俊玲,等. 微波处理对苹果汁中棒曲霉素的破坏作用[J]. 农业机械学报,2006, 37(3):64 – 67.

Zhang Xiaoping, Li Yuanrui, Shi Junling, et al. Patulin destabilization in acid solution using microwave [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(3):64 – 67. (in Chinese)

11 Nagy H A, Loutfy A, Moussa A. Influence of gamma-radiation on mycotoxin producing moulds and mycotoxins in fruits[J]. Food

- Control, 2002, 13(4-5): 281-288.
- 12 Funes G J, Gomez P L, Resnik S L, et al. Application of pulsed light to patulin reduction in McIlvaine buffer and apple products [J]. Food Control, 2013, 30(2): 405-410.
- 13 Coelho A R, Celli M G, Sataque Ono E Y, et al. Patulin biodegradation using *Pichia ohmeri* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. World Mycotoxin Journal, 2008, 1(3): 325-331.
- 14 Fuchsa S, Sontaga G, Stidla R, et al. Detoxification of patulin and ochratoxin A, two abundant mycotoxins, by lactic acid bacteria [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(4): 1398-1407.
- 15 左社强, 唐志坚, 张平, 等. 超声波技术在环境保护领域中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2003, 26(增刊 1): 82-84.
Zuo Sheqiang, Tang Zhijian, Zhang Ping, et al. Application of ultrasound technology in environment protection [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 26(Supp. 1): 82-84. (in Chinese)
- 16 高振鹏, 岳田利, 袁亚宏, 等. 超声波强化有机溶剂提取石榴籽油的工艺优化 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 77-80.
Gao Zhenpeng, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Technology optimization on extracting pomegranate seed oil using organic solvent assisted by ultrasound [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 77-80. (in Chinese)
- 17 van Boekel M A J S. Kinetic modeling of food quality: a critical review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 144-158.
- 18 郭洪光, 黄鑫, 高乃云, 等. 超声波降解乐果的动力学和影响因素分析 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(1): 208-213.
Guo Hongguang, Huang Xin, Gao Naiyun, et al. Analysis on the impact factors and kinetics of the sonolytic degradation of dimethoate [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 208-213. (in Chinese)
- 19 刘森, 冷粟, 陈嵩岳, 等. 改性 Ti/SnO₂-Sb 电极降解硝基苯废水 [J]. 高等学校化学学报, 2013, 34(8): 1899-1906.
Liu Miao, Leng Su, Chen Songyue, et al. Degradation of nitrobenzene wastewater with modified Ti/SnO₂-Sb electrode [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2013, 34(8): 1899-1906. (in Chinese)
- 20 常春, 祝凌燕, 朱淑贞. 纳米零价铁对 γ -HCH 的降解效果及机理研究 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(2): 167-173.
Chang Chun, Zhu Lingyan, Zhu Shuzhen. Degradation efficiency and mechanisms of γ -hexachlorocyclohexane by nanoscale zero valent iron particles [J]. China Environmental Science, 2010, 30(2): 167-173. (in Chinese)
- 21 唐玉霖, 高乃云, 庞维海. 超声波技术在饮用水中应用的研究进展 [J]. 给水排水, 2007, 33(12): 113-118.
Tang Yulin, Gao Naiyun, Pang Weihai. Progress on research of ultrasonic technology for drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(12): 113-118. (in Chinese)
- 22 Aktar W, Paramasivam M, Sen Gupta D, et al. Impact assessment of pesticide residues in fish of ganga river around kolkata in west bengal [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 157(1-4): 97-104.
-

(上接第 251 页)

- 8 骆蒙, 李天然, 张治中, 等. 河套蜜瓜 *Cucumis Melo* CV Hetao 成熟期中某些生理生化过程的变化 [J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 1996, 27(2): 234-236.
Luo Meng, Li Tianran, Zhang Zhizhong, et al. Changes of some physiological and biochemical processes during ripening of fruit in *Cucumis Melon* CV Hetao [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Inner Mongolia, 1996, 27(2): 234-236. (in Chinese)
- 9 严衍禄, 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: 98-109.
- 10 史永刚, 冯新沪, 李子存. 化学计量学 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2003: 141-143.
- 11 陆婉珍, 袁洪福, 徐广通, 等. 现代近红外光谱分析技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 58-60.
- 12 Zude M, Pflanz M, Spinelli L, et al. Non-destructive analysis of anthocyanins in cherries by means of Lambert-Beer and multivariate regression based on spectroscopy and scatter correction using time-resolved analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(1): 68-75.
- 13 左飞, 万晋森, 刘航. Visual C++ 数字图像处理开发入门与编程实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 550-584.
- 14 肖文东, 马本学. 基于 OpenCV 哈密瓜纹理特征的提取 [J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(1): 108-109.
Xiao Wendong, Ma Benxue. The image texture extraction of Hami melon based on OpenCV [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2011, 29(1): 108-109. (in Chinese)
- 15 陈胜勇, 刘盛. 基于 OpenCV 的计算机视觉技术实现 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 16 刘慧英, 王小波, 张丽红. 基于 OpenCV 的车辆轮廓检测 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(12): 2987-2991.
Liu Huiying, Wang Xiaobo, Zhang Lihong. A vehicle contours detection method based on OpenCV [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(12): 2987-2991. (in Chinese)