

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.032

# 玉米粉中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 微波降解技术\*

王周利 王玉堂 刘学波 崔璐 刘朝霞 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:** 应用微波辐照技术降解玉米粉中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>), 采用免疫亲和柱净化-高效液相色谱-柱后衍生的方法测定玉米粉中 AFB<sub>1</sub> 的含量。试验考察了微波辐照功率、微波辐照时间以及 AFB<sub>1</sub> 初始含量对其降解效率的影响, 并与传统加热法进行比较。结果表明: 微波辐照主要利用非热效应对 AFB<sub>1</sub> 进行降解, 当功率为 250 W、时间为 30 min 时, AFB<sub>1</sub> 降解率大于 90%, 残留量在国标和欧盟安全限量范围之内。微波辐照处理对玉米粉营养品质影响较小, 且 AFB<sub>1</sub> 降解产物毒性明显降低, 不会产生二次污染。

**关键词:** 玉米粉 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 微波辐照 降解

**中图分类号:** TS201.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0193-05

## Degradation of Aflatoxin B<sub>1</sub> in Corn Flour by Microwave Radiation

Wang Zhouli Wang Yutang Liu Xuebo Cui Lu Liu Zhaoxia Yue Tianli

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

**Abstract:** A microwave irradiation technique was applied for degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>) in corn flour, and immunoaffinity column clean-high performance liquid chromatography-post-column derivatization method was applied to determine the content of AFB<sub>1</sub>. The effects of microwave power, irradiation time and initial quality of AFB<sub>1</sub> on degradation efficiency were investigated. Microwave irradiation was compared with conventional heating method. The results showed that the degradation of AFB<sub>1</sub> was performed by non-thermal effect. The optimized microwave power was 250 W and irradiation time was 30 min. Under this condition, the degradation rate would reach to 90%. The residues of AFB<sub>1</sub> were in the safety limit range of the national standard and the European Union. The nutrition quality of corn flour was slightly affected by the microwave irradiation treatment. The toxicity of AFB<sub>1</sub> was reduced obviously and there was no secondary pollution. Therefore, the microwave irradiation can be used as an effective method for the degradation of AFB<sub>1</sub>.

**Key words:** Corn flour Aflatoxin B<sub>1</sub> Microwave radiation Degradation

### 引言

黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (Aflatoxin, AFB<sub>1</sub>) 是黄曲霉菌 (*Aspergillus flavus*)、寄生曲霉菌 (*Aspergillus parasiticus*) 等产毒菌株产生的次生代谢产物, 属于强毒性物质<sup>[1-3]</sup>。从化学结构上看, AFB<sub>1</sub> 是二氢呋喃氧杂萘邻酮的衍生物, 均含有一个双呋喃环和一

个氧杂萘邻酮(香豆素), 前者是基本的毒素结构, 而后者与致癌有关<sup>[4]</sup>。AFB<sub>1</sub> 广泛存在于发生霉变的食品中, 尤其是花生、玉米以及谷类。高秀芬等对中国部分地区玉米中黄曲霉毒素污染现状进行调查, 发现黄曲霉毒素阳性率达到 75.63%, 我国各地的玉米均不同程度受到黄曲霉毒素污染<sup>[5]</sup>。在热带和亚热带地区食品中, 黄曲霉毒素的检出率也非

收稿日期: 2013-06-12 修回日期: 2013-07-03

\* 国家自然科学基金资助项目(31071550)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK17B06、2012BAD31B01)和校基本科研青年资助项目(7109021104)

作者简介: 王周利, 博士生, 主要从事食品安全控制研究, E-mail: wzl1014@nwsuaf.edu.cn

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

常高<sup>[6]</sup>。农产品中黄曲霉毒素的控制已成为食品安全领域的研究热点之一。

目前,黄曲霉毒素毒性去除和控制有物理方法、化学方法和生物学方法<sup>[7-13]</sup>。而微波作为一种前景广阔的应用技术,在化学成分和有机物提取,有机降解反应,食品干燥等方面应用广泛<sup>[14-19]</sup>。微波为一种波长为1 mm~1 m的电磁波,具有穿透性、选择性加热和非热特性,其对物质降解的原理是利用微波能量使目标成分分子高速旋转,产生强烈的刺激作用并削弱其某些化学键直至断裂,从而达到降解的目的<sup>[20]</sup>。因此,本文采用改装的微波装置对玉米粉中的 AFB<sub>1</sub> 进行降解,以期获得一种简单有效、对食品营养品质影响小且不会产生二次污染的黄曲霉毒素降解方法,并采用液相质谱对降解产物进行揭示,为食品中黄曲霉毒素的降解提供新的方法。

## 1 试验

### 1.1 仪器与试剂

LC-2010A 型高效液相色谱仪,RF-10AL 型荧光检测器,柱后衍生系统(日本岛津公司);4000QTRAP 型串联四级杆线性离子阱多级质谱仪(美国 AB 公司);CHZ-82A 型恒温振荡器(常州国华电器有限公司);DELTA320 型 pH 计(梅多勒-托利多集团);AflaTest 免疫亲和柱(美国 Vicam 公司);玻璃纤维滤纸(英国 Whatman 公司);ZNHW-II 型智能恒温电热套(巩义市科瑞仪器有限公司)。黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 标准品购于 Sigma 公司,纯度大于 99%;乙腈、甲醇均为 HPLC 级试剂;氯化钠、碘等试剂均为分析纯。玉米样品购于陕西杨凌农贸市场。

微波发生装置由微波炉改装而成,如图 1 所示。通过对微波炉的改装,使输出功率连续可调,同时可进行搅拌和测温,这种方式更易于准确控制微波辐照过程,可对微波辐照降解的多项试验参数进行准确考查。

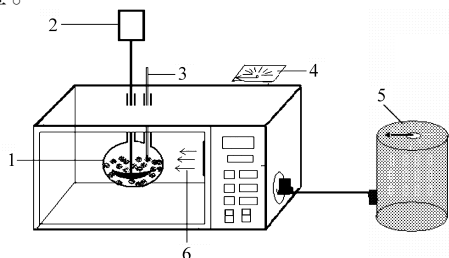


图 1 微波装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microwave equipment

1. 圆底烧瓶 2. 搅拌器 3. 温度计 4. 电流表 5. 功率控制变压器 6. 微波辐射源

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 样品制备

准确称取一定量 AFB<sub>1</sub> 标准品,用甲醇溶解配制为 100 mg/L 的储备液,密封保存于 4℃ 冰箱中。使用时将一定量储备液加入到玉米粉中(玉米样品用粉碎机粉碎后通过  $\phi$  0.45 mm 筛),搅拌均匀,室温下避光挥干,最终得到质量比分别为 10.0  $\mu$ g/kg 和 25.0  $\mu$ g/kg 加标样品。同时,以未被黄曲霉毒素污染的玉米样品作为空白样品进行试验。

### 1.2.2 微波辐照降解

准确称取 25.0 g 玉米粉加标样品,放入 250 mL 双口圆底烧瓶中,调节搅拌器转速,根据设定微波辐照功率(50、100、150、200、250、300 W)、时间(5、10、20、30、40、50 min)进行处理。辐照完成后,冷却,取出圆底烧瓶待用。由于温度计内部的液体自身会吸收微波,当需要测定降解体系温度时,插入温度计,并暂停微波辐照。

### 1.2.3 传统加热降解

准确称取 25.0 g 玉米粉样品,置于 250 mL 双口圆底烧瓶中,将圆底烧瓶放入电热套中加热,调节搅拌器转速,设定电热套加热功率,同时进行温度测定,加热完成后,冷却,取出圆底烧瓶待用。

### 1.2.4 样品提取与净化

将 5 g 氯化钠和 100 mL 甲醇-水(体积比 4:1)溶液加入辐照后的玉米粉样品中,震荡提取 30 min,过滤提取物并收集滤液于干净的玻璃容器中。取 5 mL 滤液,加入 45 mL 体积分数 10% 的吐温 PBS 缓冲液,混匀,用玻璃纤维滤纸过滤。取 10 mL 滤液,以 1~2 滴/s 的流速全部通过 AflaTest-P 免疫亲和柱,直至空气进入到亲和柱中,将 10 mL 的纯水以 2 滴/s 的流速通过亲和柱,最后用 1.0 mL HPLC 级甲醇以 1~2 滴/s 的流速淋洗亲和柱,将全部洗脱液收集于玻璃测试管中,采用 HPLC 测定 AFB<sub>1</sub> 含量(残留量),并计算降解率,即

$$T = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $T$ ——降解率, %

$C_0$ ——微波辐照处理前 AFB<sub>1</sub> 添加量,  $\mu$ g/kg

$C_i$ ——微波辐照处理后 AFB<sub>1</sub> 残留量,  $\mu$ g/kg

### 1.2.5 色谱条件

色谱柱: C<sub>18</sub> (Cloversil, 4.6 mm  $\times$  150 mm, 5  $\mu$ m), 进样体积 20  $\mu$ L, 柱温 25℃, 流速 1.0 mL/min; 流动相 甲醇: 水(体积比)为 9:11; 柱后衍生溶液为 0.05% 碘溶液, 流速为 0.2 mL/min, 柱后衍生反应温度 70℃, 荧光检测器激发波长 360 nm, 发射波长 440 nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 检测方法

按一定浓度梯度系列稀释标准品储备液,对标准品进行液相分析。以标准液质量浓度  $C$  ( $\mu\text{g}/\text{L}$ ) 为横坐标,以峰面积  $A$  为纵坐标作线性回归,  $\text{AFB}_1$  在所配制的质量浓度范围内线性关系良好,回归方程为  $A = 10\,403C + 1\,976.0$ ,  $R^2 = 0.999\,8$ 。对  $\text{AFB}_1$  标准品连续进样 6 次,其精密度 (RSD) 为 0.63%。以信噪比 3:1 作为检出限,  $\text{AFB}_1$  的检出限为  $0.25\ \mu\text{g}/\text{kg}$ ;以信噪比 10:1 作为定量限,  $\text{AFB}_1$  的定量限为  $0.80\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 。试验对  $\text{AFB}_1$  含量为  $25.0\ \mu\text{g}/\text{kg}$  加标样品进行测定,考查方法的回收率,回收率范围 89.7% ~ 94.1%。

### 2.2 微波辐照功率对 $\text{AFB}_1$ 降解的影响

经 30 min 不同功率微波辐照后,玉米粉中  $\text{AFB}_1$  残留量如图 2 所示。对于不同添加水平的样品,辐照功率从 50 W 递增至 300 W 过程中,  $\text{AFB}_1$  的含量随微波辐照功率的增加逐渐降低,当微波功率达到 250 W 时,  $10\ \mu\text{g}/\text{kg}$  和  $25\ \mu\text{g}/\text{kg}$  2 个质量比梯度样品中  $\text{AFB}_1$  降解率分别为 87.2% 和 90.4%。当微波功率达到 300 W 时,2 个质量比梯度加标样品中  $\text{AFB}_1$  残留量均小于  $1\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 。同时,当功率设置太高时,微波辐照产生的热量不易散出,导致降解体系温度迅速升高,较长时间的高温可破坏玉米粉样品品质,试验最终确定最佳微波处理功率为 250 W。

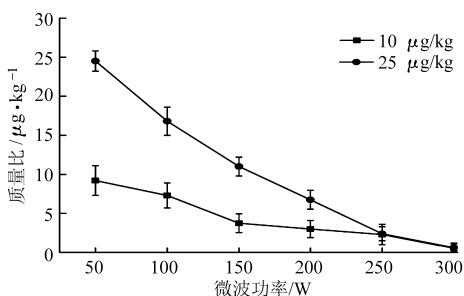


图 2 微波功率对  $\text{AFB}_1$  降解效率的影响

Fig. 2 Effect of microwave power on degradation yields of  $\text{AFB}_1$

### 2.3 微波辐照时间对 $\text{AFB}_1$ 降解的影响

在微波辐照功率为 250 W 时,考查微波辐照时间对  $\text{AFB}_1$  降解的影响。微波辐照时间分别为 5、10、20、30、40 和 50 min。玉米粉中  $\text{AFB}_1$  含量变化如图 3 所示。随着辐照时间的延长,  $\text{AFB}_1$  的含量逐渐降低,在前 30 min 微波辐照处理过程中,  $\text{AFB}_1$  残留量迅速降低,并基本降解完全;再次延长对样品中  $\text{AFB}_1$  降解没有显著影响。因此,试验确定最佳微波辐照时间为 30 min。

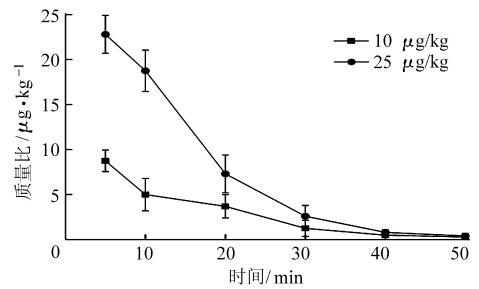


图 3 微波辐照时间对  $\text{AFB}_1$  降解效率的影响

Fig. 3 Effect of microwave time on degradation yields of  $\text{AFB}_1$

### 2.4 $\text{AFB}_1$ 初始含量对其微波降解的影响

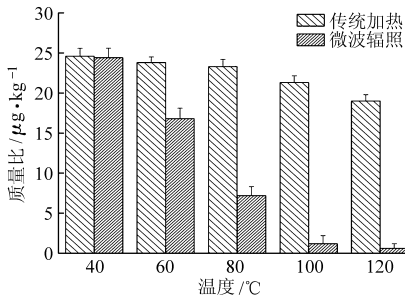
根据 GB 2761—2011《食品中真菌毒素限量》规定:玉米,玉米面(渣、片)及玉米制品中  $\text{AFB}_1$  的限量标准为  $20\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 。欧盟 2010 年修订了食品中黄曲霉素的限量标准,规定“在食用前经过分类或其他物理处理或用于食品成分的玉米和大米”中  $\text{AFB}_1$  的限量标准为  $5\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 。因此,本文选择  $10\ \mu\text{g}/\text{kg}$  和  $25\ \mu\text{g}/\text{kg}$  2 个不同的质量比梯度研究  $\text{AFB}_1$  初始质量比对其微波降解的影响。如图 2 和图 3 所示,  $\text{AFB}_1$  初始质量比对其降解有非常大的影响。随着微波辐照功率的逐渐增大,  $25\ \mu\text{g}/\text{kg}$  高质量比样品和  $10\ \mu\text{g}/\text{kg}$  低质量比样品中  $\text{AFB}_1$  残留量迅速降低,并逐渐趋于同一水平(小于  $1\ \mu\text{g}/\text{kg}$ )。同时,微波辐照功率相同时,随着处理时间的延长,不同初始质量比样品中  $\text{AFB}_1$  的残留量非常接近。微波辐照处理 30 min 时,2 个不同质量比样品中  $\text{AFB}_1$  降解率大于 90%;在 50 min 时  $\text{AFB}_1$  基本完全降解。研究表明,经过微波辐照处理后 2 个质量比样品中  $\text{AFB}_1$  残留量均小于  $1\ \mu\text{g}/\text{kg}$ ,在国标和欧盟规定的安全限量范围之内,微波辐照处理可以有效降解玉米粉中  $\text{AFB}_1$ 。

### 2.5 微波辐照与传统加热对 $\text{AFB}_1$ 降解率的比较

为了进一步揭示微波降解  $\text{AFB}_1$  的效果,本文对微波降解与传统的加热降解进行了比较。因为不同的微波功率对应不同的处理温度,因此设定微波功率为 250 W,处理时间为 30 min,传统加热处理的温度及时间与微波辐照处理条件一致,结果如图 4 所示。研究表明,采用微波辐照处理,  $\text{AFB}_1$  含量随体系温度的增加而降低,当体系温度为  $100^\circ\text{C}$  时,  $\text{AFB}_1$  降解率达到 95.51%。采用传统加热处理,当温度达到  $120^\circ\text{C}$  时,  $\text{AFB}_1$  降解率为 21.60%。通过与传统加热处理方式对比可知,微波辐照可有效降解  $\text{AFB}_1$ ,微波辐照对  $\text{AFB}_1$  的降解主要为非热效应。

### 2.6 微波辐照对玉米粉品质影响

以水分、蛋白质和脂肪为指标,考察微波辐照对玉米粉营养品质的影响。当微波辐照功率分别为

图4 不同处理方式对 AFB<sub>1</sub> 降解效率的影响Fig. 4 Effect of different treatment on degradation yields of AFB<sub>1</sub>

250 W 和 200 W 时,降解体系温度分别为 99.0℃ 和 82.0℃,在相同温度下以传统的加热方式为对照,结果如表 1 所示。微波辐照和传统加热均对玉米粉中水分有一定的影响,玉米粉的含水率有所降低,加热前、后蛋白质和脂肪含量没有显著的变化。微波辐照对玉米粉营养品质影响较小,是一种有效的去除黄曲霉毒素的方法。

表 1 微波辐照对玉米品质的影响

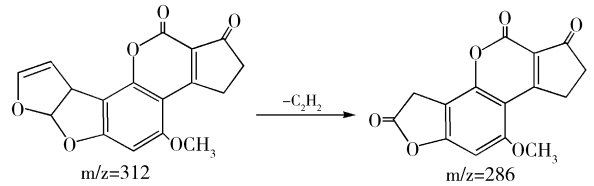
Tab. 1 Microwave irradiation on quality of maize

营养成分	处理前	微波辐照后		传统加热后	
		200 W/82℃	225 W/99℃	82℃	99℃
含水率	24.13	18.59	18.22	19.69	19.46
蛋白质质量分数	8.56	8.47	8.55	8.49	8.58
脂肪质量分数	3.61	3.65	3.64	3.57	3.66

## 2.7 黄曲霉毒素降解产物分析

为了进一步明确 AFB<sub>1</sub> 的降解产物,本研究将 AFB<sub>1</sub> 标准储备液加入到水中直接微波处理,以排除干扰,简化步骤,获得全部信息,并进行质谱分析。通过对微波辐射处理前后样品及空白液一级质谱扫描发现(扫描范围为 100 ~ 500 m/z),微波处理后,离子碎片 287.2 m/z 和 261.2 m/z 的丰度明显增高,而 AFB<sub>1</sub> (313.2 m/z) 二级质谱扫描没有发现 287.2 m/z 碎片信息,说明微波降解产物与离子源碎片降解不同。通过对比分析降解前、后 AFB<sub>1</sub> 的质谱图谱,可以看出经过微波处理的样品在 287.2 m/z 有较强的离子

信号。以 313.2 m/z 和 287.2 m/z 为离子对降解液和加标降解样品进行 LC-MS/MS (MRM) 测定,均检测到 287.2 m/z 的组分,从而判断主要降解产物分子量为 286 m/z。通过二级质谱分析,AFB<sub>1</sub> 降解产物的化学结构如图 5 所示。黄曲霉毒素分子中的二呋喃环双键极易产生环氧化反应形成 2,3-环氧化物,这种氧化物和核酸大分子中的亲核基团结合而影响核酸的结构和功能,所以二呋喃环的末端具有双键时,化合物的毒性是最强的,并有致癌性。通过化学结构可以分析得到,286 m/z 分子不存在二呋喃环双键基团,说明微波降解后 AFB<sub>1</sub> 的毒性明显降低,微波辐照后的 AFB<sub>1</sub> 不会产生二次污染。

图 5 AFB<sub>1</sub> 降解路径及结构推测Fig. 5 Degradation pathway and structure of AFB<sub>1</sub>

## 3 结论

(1) 优化获得了微波辐照降解玉米粉中 AFB<sub>1</sub> 的最佳条件:微波功率 250 W,处理时间 30 min。在此条件下,经过微波辐照处理后 2 个质量比样品中 AFB<sub>1</sub> 降解率大于 90%,残留量均在国标和欧盟安全限量范围之内。通过与传统的加热处理方式对比,表明微波辐照对 AFB<sub>1</sub> 的降解主要为非热效应。

(2) 对微波辐照处理前后玉米粉品质进行了比较,微波辐照后玉米粉的含水率有所降低,蛋白质和脂肪质量分数没有显著的变化。说明微波辐照对玉米粉营养品质影响较小,是一种有效的黄曲霉毒素降解方法。

(3) 采用 LC-MS/MS 分析了 AFB<sub>1</sub> 降解产物,微波处理后 AFB<sub>1</sub> 结构中二呋喃环双键基团消失,说明微波降解后 AFB<sub>1</sub> 的毒性明显降低,微波辐照后的 AFB<sub>1</sub> 不会产生二次污染。

## 参 考 文 献

- Herzallah S, Alshwabkeh K, AL Fataftah A. Aflatoxin decontamination of artificially contaminated feeds by sunlight,  $\gamma$ -radiation, and microwave heating [J]. Journal of Applied Poultry Research, 2008, 17(4): 515 ~ 521.
- Safara M, Zaini F, Hashemi S J. Aflatoxin detoxification in rice using citric acid [J]. Iranian Journal of Public Health, 2010, 39(2): 24 ~ 29.
- Mobeen A K, Aftab A, Asif A, et al. Aflatoxins B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> contamination of peanut and peanut products and subsequent microwave detoxification [J]. Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences, 2011, 1(1): 1 ~ 3.
- 翟红艳, 黄天壬. 黄曲霉毒素与肝癌关系研究现状 [J]. 医学研究杂志, 2008, 37(1): 93 ~ 95.
- 高秀芬, 荫士安, 张宏元, 等. 中国部分地区玉米中 4 种黄曲霉毒素污染调查 [J]. 卫生研究, 2011, 40(1): 46 ~ 49. Gao Xiufen, Yin Shian, Zhang Hongyuan, et al. Aflatoxin contamination of corn samples collected from six regions of China [J].

- Journal of Hygiene Research, 2011, 40(1): 46 ~ 49. (in Chinese)
- 6 Moss M O. Risk assessment for aflatoxins in foodstuffs [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2002, 50(3):137 ~ 142.
- 7 Pervin B, Uemran A. Microwave irradiation of hazelnuts for the control of aflatoxin producing aspergillus parasiticus [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(1): 113 ~ 117.
- 8 Hakan K, Sebahattin N. Combined effect of pH and heat treatment on deradation of aflatoxins in dried figs [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2009, 33(Supp.1): 329 ~ 339.
- 9 Wang S, Liu H, Lin J, et al. Can ozone fumigation effectively reduce aflatoxin B<sub>1</sub> and other mycotoxins contamination on stored grain? [C]//10th International Working Conference on Stored Product Protection, 2010,425:582 ~ 588.
- 10 Tripathi S, Mishra H N. Enzymatic coupled with UV degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> in red chili powder [J]. Journal of Food Quality, 2010, 33(Supp.1):186 ~ 203.
- 11 Mendez-Albores A, Arambula-Villa G, Loarea-Pina M G F, et al. Safety and efficacy evaluation of aqueous citric acid to degrade B-aflatoxins in maize [J]. Food and Chemical Toxicology, 2005, 43(2):233 ~ 238.
- 12 el Khoury Andre, Atoui Ali, Yaghi Joseph. Analysis of aflatoxin M<sub>1</sub> in milk and yogurt and AFM1 reduction by lactic acid bacteria used in Lebanese industry [J]. Food Control, 2011, 22(10):1 695 ~ 1 699.
- 13 Mohsen F, Shi Zhiqi, Alireza G, et al. Aflatoxin B<sub>1</sub> degradation by Bacillus subtilis UTBSP1 isolated from pistachio nuts of Iran [J]. Food Control, 2012, 23(1): 100 ~ 106.
- 14 陈晓青,孙娟,刘茜,等. 微波辅助提取虎杖中白藜芦醇苷[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2007, 38(4): 686 ~ 691.  
Chen Xiaoqing, Sun Juan, Liu Qian, et al. Microwave-assisted extraction method for piceid from *Polygonum cuspidatum* Sieb et Zucc [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(4): 686 ~ 691. (in Chinese)
- 15 朱兴一,谢捷,忙怡丽,等. 微波辅助提取银杏叶萜类内酯的工艺研究[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(6): 1 080 ~ 1 083.  
Zhu Xingyi, Xie Jie, Mang Yili, et al. Study on microwave assisted extraction of terpene lactones from *Ginkgo biloba* L [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2009, 23(6): 1 080 ~ 1 083. (in Chinese)
- 16 朱德文,岳鹏翔,王继先,等. 茶叶微波超声波耦合动态逆流浸提工艺[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 136 ~ 140.  
Zhu Dewen, Yue Pengxiang, Wang Jixian, et al. Combined dynamic countercurrent extraction technology with microwave ultrasonic-wave extraction for tea [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 136 ~ 140. (in Chinese)
- 17 王玉堂,李绪文,金海燕,等. 人参中人参皂苷的直接高压微波辅助降解[J]. 高等学校化学学报, 2007, 28(12): 2 264 ~ 2 269.  
Wang Yutang, Li Xuwen, Jin Haiyan, et al. Degradation of ginsenosides in root of *Panax ginseng* C. A. Mey. by high-pressure microwave-assisted extraction [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2007, 28(12): 2 264 ~ 2 269. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 杨薇,欧又成,张付杰,等. 蘑菇热风、微波对流和微波真空干燥的对比试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6):102 ~ 105.  
Yang Wei, Ou Youcheng, Zhang Fujie, et al. Comparative experiment on hot-air, microwave-convective and microwave-vacuum drying of mushroom [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):102 ~ 105. (in Chinese)
- 20 范会平,符锋,Mazza Giuseppe,等. 微波提取法对櫻桃、猕猴桃和枸杞多糖特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 355 ~ 360.  
Fan Huiping, Fu Feng, Mazza Giuseppe, et al. Effects of microwave extraction on characteristics of polysaccharides from cherry, kiwi and wolfberry [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 355 ~ 360. (in Chinese)

(上接第 208 页)

- 9 韩安太,何勇,陈志强,等. 基于无线传感器网络的茶园分布式灌溉控制系统[J]. 农业机械学报,2011,42(9):173 ~ 180.  
Han Antai, He Yong, Chen Zhiqiang, et al. Design of distributed precision irrigation control system based on wireless sensor network for tea plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 173 ~ 180. (in Chinese)
- 10 王新忠,顾开新,刘飞. 基于无线传感网络的丘陵果园灌溉控制系统[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):364 ~ 368.  
Wang Xinzong, Gu Kaixin, Liu Fei. Hill orchard irrigation control system based on wireless sensor networks [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 364 ~ 368. (in Chinese)
- 11 柳平增,臧官胜,邓振民,等. 一种低成本作物叶绿素检测仪的研制[J]. 计算机测量与控制,2012,20(4):1 155 ~ 1 158.  
Liu Pingzeng, Zang Guansheng, Deng Zhenmin, et al. Development of a low-cost crop chlorophyll detector [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(4): 1 155 ~ 1 158. (in Chinese)
- 12 毛罕平,高洪燕,张晓东. 生菜叶片含水率光谱特征模型研究[J]. 农业机械学报,2011,42(5):166 ~ 170.  
Mao Hanping, Gao Hongyan, Zhang Xiaodong. Spectral characteristics model of lettuce leaves' water content [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 166 ~ 170. (in Chinese)