

基于嗅觉可视技术的醋醅理化指标分析*

管彬彬¹ 赵杰文¹ 金鸿娟¹ 林 颢^{1,2}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏恒顺醋业股份有限公司, 镇江 212013)

摘要: 通过分析 56 个不同发酵池种子醋醅乙醇脱氢酶 (ADH) 的活性与 56 个对应接种池的不挥发酸和总酸的关系, 得出将种子 ADH 活性控制在 600 ~ 700 U/mL 时, 被接种池的醋醅品质较高。利用嗅觉可视化技术结合误差反向传播人工神经网络 (BP-ANN) 模型, 快速检测种子 ADH 活性和预测被接种池不挥发酸及总酸质量分数。结果表明, BP-ANN 模型预测 ADH、不挥发酸、总酸的相关系数分别为 0.781 6、0.844 7 和 0.946 3。因此, 嗅觉可视化技术结合 BP-ANN 可有效预测醋酸发酵过程中的理化指标。

关键词: 醋醅 嗅觉可视传感器 乙醇脱氢酶 神经网络

中图分类号: TS207.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0223-05

Analysis of Physicochemical Index of Vinegar Substrate Based on Olfactory Visualization Technique

Guan Binbin¹ Zhao Jiewen¹ Jin Hongjuan¹ Lin Hao^{1,2}

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Jiangsu Hengshun Vinegar Industry Co., Ltd., Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Solid state fermentation is a distinctive technology for vinegar-making. In general, the vinegar quality was evaluated by the contents of non-volatile acid and total acid. The relationships between the contents of alcohol dehydrogenase (ADH) activity from 56 different fermentation seed tanks and the contents of non-volatile acid and total acid from 56 different vaccination fermentation tanks were analyzed. The result showed that, when ADH activity values were controlled in 600 ~ 700 U/mL, the vinegar substrate would show a good performance in quality. What's more, the olfactory visualization sensor combined with back-propagation artificial neural network (BP-ANN) was used to test the ADH activity and predict non-volatile acid and total acid. The result showed that the value of correlation coefficient of ADH activity, non-volatile acid and total acid were 0.781 6, 0.844 7 and 0.946 3, respectively. Therefore, the olfactory visualization sensor combined with BP-ANN could be well used in the prediction of physicochemical index for vinegar substrate.

Key words: Vinegar substrate Olfactory visualization sensor Alcohol dehydrogenase Neural network

引言

我国酿醋历史悠久, 香醋的生产主要包括酒精发酵、醋酸发酵和后期发酵^[1-2]。其中醋酸发酵是香醋生产过程中的重要阶段, 是由多种细菌和真菌

共同参与、将酒精转化为醋酸的过程^[3-6], 其好坏直接关系到成品醋的产量和质量^[7]。镇江香醋一直沿用传统的“固态分层发酵”生产工艺, 采用独特套种接醅, 即接种子池发酵第 8 天的醋醅铺盖于被接种池表层, 然后随着微生物菌落的增殖繁殖, 经过

收稿日期: 2015-03-10 修回日期: 2015-04-27

* 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012286) 和中国博士后科学基金特别资助项目 (2013T60509)

作者简介: 管彬彬, 博士生, 主要从事农产品、食品无损检测研究, E-mail: guanbinbinde@126.com

通讯作者: 林颢, 副教授, 主要从事农产品加工、品质检测研究, E-mail: linhaolt794@163.com

2 d 的提热后,每天向下翻一层醋醅(即过杓)。第 9 天翻到池底,之后每天从表层到底层翻一遍(即露底),发酵至 19 d 结束^[8-9]。随后进入封醅阶段。固态发酵生产方式较为粗放,导致其生产批次间差异较大,产品质量不稳定。在食醋生产发酵过程中,套种接醅所采用的种子质量对成品醋的产量和质量有直接影响^[7]。因此,对食醋固态发酵种子的品质进行快速检测及表征,对其发酵过程中的品质监控及保障成品醋的质量有十分重要的意义。然而,目前对醋醅种子标准化的研究还鲜有报道。嗅觉可视化技术可以通过色敏材料对待检测气体反应前后的颜色变化而进行定性和定量分析^[10-11],是一种成本低、速度快^[12-14]、特异性识别能力强的检测方法^[15]。本文以 112 个醋醅发酵池(56 个醋醅种子池和 56 个被接种池)的醋醅为检测对象,研究乙醇脱氢酶与种子产酸能力的关系,并通过嗅觉可视化技术对醋醅的理化指标进行定量分析,为醋酸发酵的标准化研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验采集江苏恒顺集团有限公司提供的不同发酵车间、不同发酵楼层、不同发酵池的醋醅样本,共 112 个,分别于 56 个醋酸固态种子池发酵第 8 天和 56 个被接种池发酵第 19 天取样,翻醅前取样。取样时间为 2014 年 11 月 13 日—12 月 7 日,112 个样本分别位于恒顺醋业有限公司醋酸发酵一期、二期的生产车间,其中位于发酵车间 2F 的样本 34 个,3F 的样本 40 个,4F 的样本 38 个。

1.2 实验内容

1.2.1 醋醅发酵过程中乙醇脱氢酶活性的测定

准确称取 56 个醋醅种子发酵池中第 8 天(作为种子接种)的醋醅 5 g,加入 20 mL 蒸馏水,置于恒温磁力搅拌器(JB-2 型,上海雷磁)中搅拌 5 min;用纱布过滤,弃沉淀;移取 2 mL 滤液于 EP 管中,在 20℃ 室温下以 2 170 r/min 转速离心(5417R 型,德国艾本德)10 min;收集上清液,在 20℃ 温度下以 13 380 r/min 转速离心 5 min,收集沉淀(湿菌体);按体积比(细胞/裂解液)1:10 加入细菌裂解液(50 mmol Tris-HCL 缓冲液(pH8.0),10 mmol EDTA,0.1 mmol 的 PMSF(临用前加)和 0.25 mg/mL 的溶菌酶),在 37℃ 温育 1 h,在 4℃ 下以 13 380 r/min 离心 5 min,收集上清液,即为乙醇脱氢酶(ADH)粗提液。置于冰上待测各酶活性。

于 5 mL 的 EP 管中加入 1.5 mL 焦磷酸钠缓冲液(pH 值 8.8),0.5 mL 底物溶液和 1 mL NAD 辅酶

溶液,并于 37℃ 恒温水浴 10 min;加入同条件浴预热后的 ADH 粗提液 0.1 mL,并按动秒表。在连续 5 min 内,每隔 1 min 读取波长 340 nm 处的吸光度(UV-7502 型,上海欣茂紫外可见分光光度计),直至每分钟吸光度增大值达到稳定为止。酶活力的计算公式为

U=3.1E340/(0.1ΔX) (1)

式中 U——酶活力值

E340——波长 340 nm 处 5 min 内吸光度增大值

ΔX——吸光度增大的单位值,取 0.001

3.1 为试液总体积,mL;0.1 为样品酶液体积,mL。

1.2.2 醋醅种子的嗅觉可视化表征

通过前期实验,筛选出 6 种卟啉(美国 Sigma-Aldrich 公司)和 3 种疏水性 pH 指示剂(尼罗红、中性红、溴甲酚绿,国药集团化学试剂有限公司),选用聚偏二氟乙烯膜(PVDF)(美国密理博公司)作为基底材料,用毛细管手工点样^[16],制成 3×3 的可视化传感器阵列。用 CCD 相机(索尼 CMLN-13S2M/C 型)获取反应前的传感器图像。准确称取 56 个不同种子发酵池中第 8 天(作为种子接种)的醋醅 10 g 置于反应室中,与传感器阵列充分接触 10 min,使得传感器阵列与醋醅挥发性气体充分反应,然后用相机获取反应后的传感器阵列图像。图 1 是图像处理的流程图,处理软件依次将反应前后的图像进行滤波、阈值二值化、形态学处理等,通过获取每个色敏材料的中心,构建以色敏材料中心为原点、10 个像素为半径的圆作为模板,计算每个模板的 R、G、B 分量均值。将色敏材料反应前后的 R、G、B 分量均值相减后归一化,并将 3 个分量差值图融合,即得到色敏材料与醋醅样本的反应差值图。

1.2.3 醋醅发酵过程中总酸的测定

准确称取 56 个被接种的醋酸发酵池中发酵第 19 天的 10 g 醋醅放于烧杯,加入 50 mL 蒸馏水,充分搅拌后用纱布过滤,将滤液移入 100 mL 容量瓶中用蒸馏水定容,摇匀。用移液管移取 20 mL 上述溶液于 250 mL 三角瓶中,加入 60 mL 蒸馏水,混匀,加入 3 滴酚酞指示剂,利用中和法加入氢氧化钠标准溶液进行滴定,记录滴定终点所消耗的氢氧化钠体积,同时进行空白实验。总酸质量浓度的计算公式为

X=(V-V0)ck/0.2m×100% (2)

式中 X——总酸质量浓度,以乙酸计,g/mL

V——样品所消耗氢氧化钠的体积,mL

V0——空白实验所消耗的氢氧化钠体积,mL

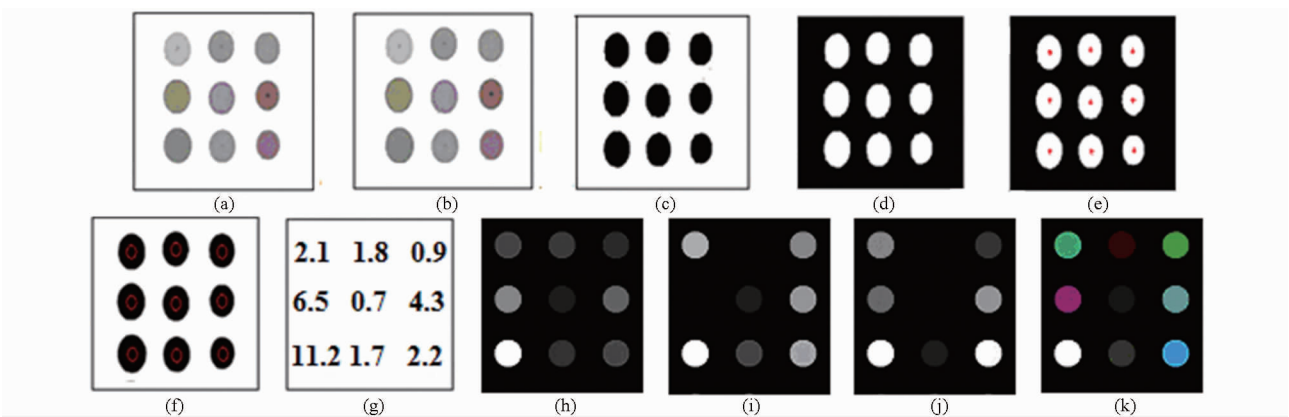


图1 色敏传感器图像处理流程图

Fig.1 Image processing of colorimetric sensor array

(a) 原图 (b) 滤波后图 (c) 二值化图 (d) 形态学处理图像 (e) 取中心点图像 (f) 特征区域图像
(g) 特征矩阵图像 (h) *R* 分量图 (i) *G* 分量图 (j) *B* 分量图 (k) 特征差值图

c——氢氧化钠标准溶液的浓度, mol/L
m——所取醋醅的质量, g
k 取 0.06, 即与 1.00 mL 氢氧化钠标准溶液相当的乙酸质量。

1.2.4 醋醅发酵过程中不挥发酸的测定

准确称取 10 g 醋醅于烧杯, 加入 30 mL 蒸馏水, 充分搅拌后过滤; 取 2 mL 滤液于单沸式蒸馏装置的蒸馏管中, 加入 8 mL 的蒸馏水摇匀; 待烧瓶中水沸腾 2 min 后, 进行蒸馏。待馏出液至 180 mL 时, 将残余液置于烧杯中; 用蒸馏水清洗蒸馏管 2 ~ 3 次, 滤液倒于烧杯中, 用蒸馏水定容至 120 mL, 加入 3 滴酚酞指示剂, 用中和法进行滴定, 同时进行空白实验。利用式 (2) 进行计算, 其中, *k* 取 0.09, 即与 1.00 mL 氢氧化钠标准溶液相当的乳酸质量。

表2 不同发酵车间乙醇脱氢酶活性单因素方差分析

Tab.2 One-way ANOVA of ADH activity in each room

差异源	平方和	自由度	均方	组间均方/组内均方	<i>P</i> 值	<i>F</i> 临界值
组间	40 988. 29	2	20 494. 14	1. 141 862	0. 326 951	3. 171 626
组内	951 244. 2	53	17 948			
总计	992 232. 5	55				

活性没有显著差异, 因此, 样本的选取是随机均匀的。

醋中总酸质量浓度的高低直接决定了恒顺香醋品质的好坏^[17], 醋中的乳酸、苹果酸、焦谷氨酸等不挥发酸有利于改善酸味质量, 使得酸味柔和醇厚。实践经验表明, 不同季节生产的醋样品质差异较大, 尤其是在冬季, 其不挥发酸质量浓度相对其他季节较低, 因此, 如何提高冬季醋醅的不挥发酸产量显得尤为重要。将乙醇脱氢酶活性分成 5 个区间, 不同乙醇脱氢酶活性范围内的不挥发酸和总酸平均值如表 3 所示, 并将数据用最小显著性差异法 LSD (Least-significant difference) 完成各区间均值间的两

2 结果与分析

2.1 醋醅理化指标的基础分析

首先基于不同发酵车间醋醅种子的乙醇脱氢酶活性进行了单因素方差分析, 表 1、2 分别是不同发酵车间的乙醇脱氢酶活性分布情况和单因素方差分析结果; *P* 值表明, 不同发酵车间醋醅种子的 ADH

表1 不同发酵车间乙醇脱氢酶活性分布情况

Tab.1 Distribution of ADH activity in each room

发酵车间	样本数	范围/ (U·mL ⁻¹)	平均值/ (U·mL ⁻¹)	方差/ (U ² ·mL ⁻²)
2F	17	403 ~ 930	813. 294 1	16 280. 47
3F	20	403 ~ 992	790. 5	17 652. 05
4F	19	465 ~ 1 085	747. 263 2	19 742. 65

两比较。从表 3 中可以看出, 种子醋醅的 ADH 活性主流分布区间是 800 ~ 900 U/mL, 然而这区间对应的被接种池醋醅的不挥发酸和总酸质量浓度均最低。因此, 有必要对种子醋醅的乙醇脱氢酶活性与被接种池成熟醋醅的总酸和不挥发酸质量浓度之间的关系进行分析, 选取产酸量高的醋醅种子进行接种。从表 3 中可以看出, 种子醋醅 ADH 活性在 600 ~ 700 U/mL 所对应的不挥发酸含量与活性在 700 ~ 900 U/mL 对应的不挥发酸含量存在差异, 当种子醋醅的 ADH 活性控制在 600 ~ 700 U/mL 之间时, 其跟踪池醋醅的不挥发酸质量浓度平均值为 0. 005 078 mg/mL, 相比于用其他活性区间内的种

子醋醅接种的跟踪池醋醅,其不挥发酸质量浓度提高了 10% 左右,此外,其总酸质量浓度平均值也为最高。因此,可以通过检测种子的乙醇脱氢酶活性,

选取乙醇脱氢酶活性在 600 ~ 700 U/mL 区间的醋醅作为种子接种,来提高被接种池的醋酸产量与质量。

表 3 不同乙醇脱氢酶活性范围内理化指标的平均值

Tab.3 Average value of physicochemical index in the range of different ADH activities				
ADH 活性范围/(U·mL ⁻¹)	ADH 活性/(U·mL ⁻¹)	不挥发酸质量浓度/(mg·mL ⁻¹)	总酸质量浓度/(mg·mL ⁻¹)	样本数
<600	489.8 ± 94.03	0.004 608 ± 0.000 65 ^{ab}	0.053 457 ± 0.001 665 ^a	5
600 ~ 700	645.86 ± 30.48	0.005 078 ± 0.000 225 ^a	0.053 967 ± 0.002 082 ^a	6
700 ~ 800	739.23 ± 27.86	0.004 539 ± 0.000 378 ^b	0.052 135 ± 0.002 248 ^a	13
800 ~ 900	846.92 ± 35.48	0.004 531 ± 0.000 544 ^b	0.050 497 ± 0.005 174 ^a	25
>900	961 ± 59.36	0.004 651 ± 0.000 472 ^{ab}	0.053 127 ± 0.002 025 ^a	7

注:α=0.05,字母相同表示之间关系不显著,字母不同表示之间关系显著。

2.2 BP-ANN 模型预测醋醅理化指标结果

图 2 是色敏材料与酶活不同的醋醅挥发气体反应的色敏传感器差值图像。从图 2 中可以看出,嗅觉可视化色敏传感器阵列对醋醅气体有一定的敏感性,不同酶活的醋醅挥发气体均与色敏材料发生了不同程度的反应。此外,醋醅酶活的不同在差值图像上也有所反映。其中,酶活分别是 620 U/mL 和 755 U/mL 的醋醅反应时,色敏传感器阵列中的整体图像亮度比另外两个更大,这意味着在此酶活状况下,色敏传感器与醋醅挥发气体反应差值较大,反应得较为充分。此外,不同酸度的醋醅挥发气体在嗅觉可视化色敏传感器阵列也呈现出一定的差别。为了进一步探索采用嗅觉可视化传感器监测醋醅品质的可行性,利用 neuroshell2 软件采用 BP-ANN 模型结合嗅觉可视化技术检测种子醋醅中的乙醇脱氢酶活性,并预测被接种发酵池中成熟醋醅的不挥发酸

和总酸质量浓度。输入值为色敏材料阵列的特征变量(9 种色敏材料 *R*、*G*、*B* 3 个分量,27 维),利用主成分降维,分别以前 5 ~ 15 个主成分的特征变量作为 BP 神经网络的输入变量,并且分别以乙醇脱氢酶活性、总酸和不挥发酸测得值作为输出变量构建各自的模型。初始权重 0.3,学习速率和动量因子均为 0.1,训练迭代次数设为 100 次;隐含层和输出层均使用双曲正切函数(tanh)为传递函数。56 个醋醅样本中随机抽取 38 个样本作为训练集,其余 18 个样本作为预测集。模型用交互验证均方根误差(Root mean square error of cross-validation, RMSECV)作为网络训练的评估标准,预测均方根误差(Root mean square error of prediction, RMSEP)评价模型的预测效果,用相关系数 *R* 来评价预测值和实测值之间的相关性。

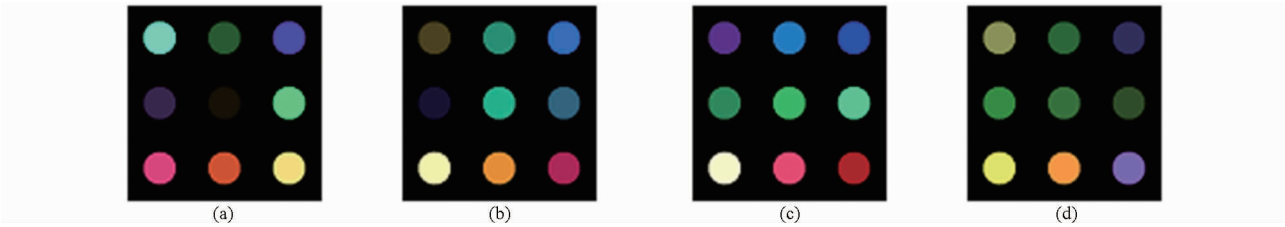


图 2 不同酶活醋醅传感器响应特征图像
Fig.2 Characteristic images of vinegar substrate with different ADH activities
(a) 403 U/mL (b) 620 U/mL (c) 755 U/mL (d) 899 U/mL

表 4 是不同主成分因子数下的醋醅乙醇脱氢酶活性、总酸、不挥发酸的 BP-ANN 模型评价指标,其中,*R_c*指训练集样本预测值与实测值之间的相关系数,*R_p*指预测集样本预测值与实测值之间的相关系数。图 3 是实测值与 BP-ANN 模型预测值的相关关系图,从表 4 和图 3 中可以看出,当提取前 9 个主成分作为输入变量时,预测乙醇脱氢酶的模型最优,此时模型训练集的 RMSECV 值为 57.30,*R_c*值为 0.924 6,预测集的 RMSEP 值为 71.99,*R_p*值为 0.781 6。当提取前 14 个主成分作为输入变量时,预

测总酸的模型最优,此时模型训练集的 RMSECV 值为 0.000 162,*R_c*值为 0.999 3,预测集的 RMSEP 值为 0.001 453,*R_p*值为 0.946 3。当提取前 12 个主成分作为输入变量时,预测乳酸的模型最优,此时模型训练集的 RMSECV 值为 0.000 004,*R_c*值为 1,预测集的 RMSEP 值为 0.000 304,*R_p*值为 0.844 7。该结果表明可视化阵列采集到的种子醋醅气味信息与种子醋醅的乙醇脱氢酶活性相关度较高,可以用来定量检测醋醅的乙醇脱氢酶活性;此外,可视化阵列采集到的种子醋醅气味信息与被接种池成熟醋醅的不

表 4 醋醅乙醇脱氢酶、总酸、不挥发酸的 BP-ANN 模型评价指标

Tab.4 BP-ANN model results of ADH activity, total acid and non-volatile acid

主成分 因子数	乙醇脱氢酶		总酸		不挥发酸	
	R_c	R_p	R_c	R_p	R_c	R_p
5	0.473 2	0.304 5	0.992 1	0.890 8	0.944 0	0.586 6
6	0.782 1	0.587 4	0.977 5	0.742 1	0.928 7	0.615 2
7	0.781 0	0.571 6	0.960 0	0.831 3	0.927 2	0.543 4
8	0.796 1	0.590 7	0.993 8	0.916 5	0.924 0	0.572 9
9	0.924 6	0.781 6	0.974 6	0.877 6	0.951 1	0.649 2
10	0.932 1	0.734 2	0.971 4	0.835 6	0.997 3	0.831 7
11	0.933 5	0.775 2	0.997 9	0.914 4	0.999 9	0.839 6
12	0.958 3	0.757 3	0.998 7	0.903 5	1.000 0	0.844 7
13	0.939 1	0.747 2	0.999 6	0.915 7	0.988 4	0.775 7
14	0.977 0	0.769 5	0.999 3	0.946 3	0.992 2	0.790 7
15	0.806 6	0.444 0	0.999 5	0.942 4	0.984 5	0.781 2

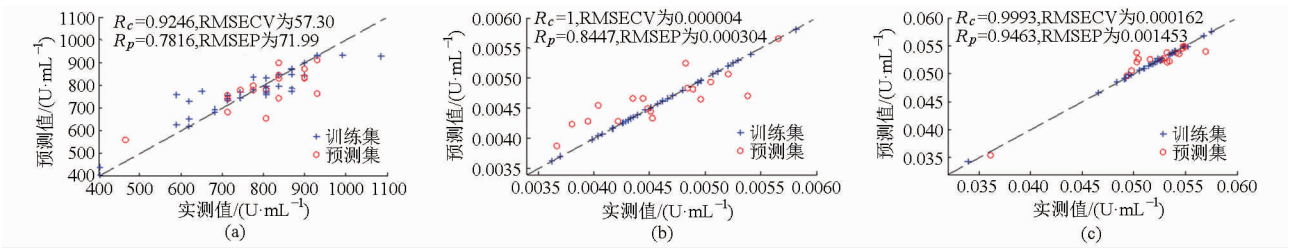


图 3 实测值与 BP-ANN 模型预测值的相关关系

Fig.3 Relationship between measured and predicted values by BP-ANN model

(a) 乙醇脱氢酶 (b) 不挥发酸 (c) 总酸

奠定基础。此外,利用嗅觉可视化技术结合 BP-ANN 预测了被接种池的不挥发酸及总酸质量浓度;结果表明,BP-ANN 模型预测不挥发酸、总酸的相

关系数分别为 0.844 7 和 0.946 3,因此,嗅觉可视化技术在醋醅的理化指标分析上有着良好的前景。

参 考 文 献

1 Shen Zhiyuan. Research on Zhenjiang vinegar's health and medical value [J]. Food Science, 2005, 26(8):483-485.

2 Shi Jiyong, Zou Xiaobo, Huang Xiaowei, et al. Rapid detecting total acid content and classifying different types of vinegar based on near infrared spectroscopy and least-squares support vector machine [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1):192-199.

3 Xu Wei, Huang Zhiyong, Zhang Xiaojun, et al. Monitoring the microbial community during solid-state acetic acid fermentation of Zhenjiang aromatic vinegar[J]. Food Microbiology, 2011, 28(6):1175-1181.

4 陶京兰, 陆震鸣, 王宗敏, 等. 实时荧光定量 PCR 监测镇江香醋醋酸发酵过程中微生物变化[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(2):156-160.

Tao Jinglan, Lu Zhenming, Wang Zongmin, et al. Detection of the variation of microorganisms in acetic acid fermentation of Zhenjiang aromatic vinegar through real-time quantitative PCR [J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(2):156-160. (in Chinese)

5 Wu J J, Ma Y K, Zhang F F, et al. Biodiversity of yeasts, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria in the fermentation of "Shanxi aged vinegar", a traditional Chinese vinegar [J]. Food Microbiol, 2012, 30(1):289-297.

6 Xu Qingping, Tao Wenyi, Ao Zhonghua. Antioxidant activity of vinegar melanoidins [J]. Food Chemistry, 2007, 102(3):841-849.

7 罗乐, 姚福荣, 刘微. 固态发酵酒糟醋与传统醋的比较研究[J]. 中国调味品, 2009, 34(4):82-84.

Luo Le, Yao Furong, Liu Wei. Comparative study on solid-state fermentation brewing lees vinegar and traditional vinegar [J]. China Condiment, 2009, 34(4):82-84. (in Chinese)

8 张丽娟, 许伟, 许泓瑜, 等. 恒顺香醋固态发酵过程中有机酸的变化分析[J]. 中国调味品, 2009, 34(2):106-109.

Zhang Lijuan, Xu Wei, Xu Hongyu, et al. Analysis of organic acids in aerobic solid-fermentation culture of hengshun vinegar [J]. China Condiment, 2009, 34(2):106-109. (in Chinese)

9 李幼筠. 中国固态发酵食醋工艺剖析[J]. 江苏调味副食品, 2002(6):1-2,12.

10 Rakow N A, Suslick K S. A colorimetric sensor array for odour visualization [J]. Nature, 2000, 406(17):710-713.

- Fan Weiwei, Huang Huihua. Application of microwave sterilization in food industry[J]. Food and Machinery, 2007, 23(1): 143 – 147. (in Chinese)
- 3 Sun Ting, Tang Juming, Joseph R. Antioxidant activity and quality of asparagus affected by microwave-circulated water combination and conventional sterilization [J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 813 – 819.
- 4 王弘. 微波杀菌机理研究的现状[J]. 中国食品工业, 2000(4): 36.
- 5 丛海花. 水产品微波辅助杀菌过程中关键问题的解决及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Cong Haihua. Solution of critical issues for microwave-assist sterilization and application to aquatic products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- 6 Ram Bhuwan Pandit, Juming Tang, Frank Liu. A computer vision method to locate cold spots in foods in microwave sterilization processes [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(12): 3667 – 3676.
- 7 Pandit R B. Development of a novel approach to determine heating pattern using computer vision and chemical marker (M-2) yield [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 522 – 528.
- 8 Wåling-Raaholt B, Ohlsson T. Improving the heating uniformity in microwave processing [M] // Schubert H, Regier M. The Microwave Processing of Foods. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2005: 292 – 316.
- 9 Chen Hao, Tang Juming, Liu Fang. Coupled simulation of an electromagnetic heating process using the finite difference time domain method [J]. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, 2007, 41(3): 50 – 68.
- 10 Chen Hao, Tang Juming, Liu Fang. Simulation model for moving food packages in microwave heating processes using conformal FDTD method [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(3): 294 – 305.
- 11 Tang Zhongwei, Galina Mikhaylenko, Liu Fang. Microwave sterilization of sliced beef in gravy in 7-oz trays [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 375 – 383.
- 12 Resurreccion Jr F P. Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(4): 406 – 416.
- 13 Tang J, Liu F, Pathak S K. Apparatus and method for heating objects with microwaves: US, 7119313[P]. 2005 – 06 – 16.
- 14 Salvi D, Boldor D, Aita G M, et al. COMSOL multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(3): 422 – 429.
- 15 Resurreccion Jr F P, Tang J, Pedrow P. Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(4): 406 – 416.
- 16 朱睿. 海产品湿式微波杀菌设备及其技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Zhu Rui. Seafood processing wet-type microwave sterilization equipment and its technical research [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- 17 朱睿, 陆建辉, 杨雷. 湿式微波杀菌试验装置谐振腔设计[J]. 机械, 2013(12): 64 – 66.
- Zhu Rui, Lu Jianhui, Yang Lei. Design of the resonant cavity for wet-type microwave sterilization device [J]. Machinery, 2013(12): 64 – 66. (in Chinese)
- 18 Pandit R B, Tang J, Mikhaylenko G. Kinetics of chemical marker M-2 formation in mashed potato—a tool to locate cold spots under microwave sterilization [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 353 – 361.

(上接第 227 页)

- 11 Neal A Rakow, Avijit Sen, Michael C Janzen, et al. Molecular recognition and discrimination of amines with a colorimetric array [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2005, 44(29): 4528 – 4532.
- 12 Hou Changjun, Dong Jiale, Zhang Guoping, et al. Colorimetric artificial tongue for protein identification [J]. Biosens Bioelectron, 2011, 26(10): 3981 – 3986.
- 13 Li Junjie, Hou Changjun, Huo Danqun, et al. Development of a colorimetric sensor array for the discrimination of aldehydes [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 196: 10 – 17.
- 14 黄星奕, 周芳, 蒋飞燕. 基于嗅觉可视化技术的猪肉新鲜度等级评判[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 142 – 145.
- Huang Xingyi, Zhou Fang, Jiang Feiyan. Evaluation of pork freshness using olfaction visualization on detection technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 142 – 145. (in Chinese)
- 15 Lim Sung H, Mix Samantha, Xu Zeyu, et al. Colorimetric sensor array allows fast detection and simultaneous identification of sepsis-causing bacteria in spiked blood culture [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2014, 52(2): 592 – 598.
- 16 赵杰文, 管彬彬, 林颢, 等. 基于嗅觉可视技术的食醋气味表征和区分[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 188 – 192.
- Zhao Jiewen, Guan Binbin, Lin Hao, et al. Characterization and discrimination of vinegar flavor based on olfaction visualization technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 188 – 192. (in Chinese)
- 17 李丹亚. 镇江香醋生产过程中风味物质和功能因子的变化规律[D]. 无锡: 江南大学, 2008.