

基于品质评价的玉米微波灭霉工艺参数选择^{*}

靳志强^{1,2} 王顺喜¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 长治学院生物科学与技术系, 长治 046011)

摘要: 测定了不同微波条件处理的玉米样品关于种子品质和加工品质的 13 项品质指标, 采用隶属函数法对各项指标数据进行转换, 通过因子分析法对玉米品质进行综合评价, 在此基础上选择最优的玉米微波灭霉工艺参数。结果表明, 隶属函数法同时考虑到玉米品质指标对评价体系的正、负影响, 采用该方法转换的数据适于因子分析; 经因子分析提取出影响玉米品质评价的 4 个公因子依次是生理生化因子、黏度特性因子、淀粉含量及组成因子和糊化特性因子, 累积方差贡献率为 94.45%; 玉米品质综合评价结果显示, 玉米品质变化是玉米初始含水率、微波处理温度和处理时间共同作用的结果, 当玉米初始含水率为 13.8%、18.4% 和 22.6% 时, 宜采用 70℃ (14 min)、50℃ (22 min) 和 60℃ (18 min) 的微波灭霉工艺参数。

关键词: 玉米 微波灭霉 因子分析 品质评价

中图分类号: TS201.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0163-08

Parameter Selection of Mould Inactivation by Microwave Processing Based on Quality Evaluation of Maize

Jin Zhiqiang^{1,2} Wang Shunxi¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Biological Science and Technology, Changzhi University, Changzhi 046011, China)

Abstract: To reduce thermal damage to maize quality caused by microwave sterilization, firstly 13 parameters of seed quality and processing quality of maize were determined, secondly the data matrix was converted by the method of subordinate function, and then the comprehensive evaluation of the quality of maize was performed by factor analysis. On this basis, the optimal parameters of mould inactivation by microwave processing were selected. The results indicated that, the method of subordinate function could integrate the positive and negative characteristics in the synthetical evaluation, so the matrix converted with this method was suitable for factor analysis. Four factors affecting quality evaluation of maize were extracted and their cumulative variance was 94.45%, which were physiological and biochemical characteristics factor, viscosity property factor, content and composition of starch factor and pasting property factor in sequence. The synthetical quality evaluation of maize suggested that, maize quality changes resulted from the interaction of the initial moisture content of maize, microwave processing temperature and processing time. Therefore, microwave processing parameters, namely, 70℃ (14 min), 50℃ (22 min) and 60℃ (18 min) should be respectively adopted when the initial moisture content of maize were 13.8%, 18.4% and 22.6%.

Key words: Maize Microwave sterilization Factor analysis Quality evaluation

收稿日期: 2012-02-05 修回日期: 2012-02-28

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD26B04)

作者简介: 靳志强, 博士生, 长治学院讲师, 主要从事农产品加工与贮藏工程研究, E-mail: jinzhiqiang888@sohu.com

通讯作者: 王顺喜, 教授, 博士生导师, 主要从事机电一体化、农产品加工与贮藏工程研究, E-mail: wsx68@cau.edu.cn

引言

玉米安全储藏问题是我国目前迫切需要解决的问题之一。玉米防霉处理一般通过严格控制水分达到防霉目的。但在实际储藏中,由于环境相对湿度较大,玉米往往吸湿严重,水分增加,导致霉变。微波加热具有穿透力强、加热快速均匀、营养成分及色、香、味在杀菌过程中损失小等特点^[1]。Lakins 等研究发现,微波加热可有效控制面包产品的霉菌生长和延长货架期^[2]。靳志强等对寄生曲霉(霉变玉米中分离得到)孢悬液的微波杀菌动力学进行研究,采用 70℃ (14 min)、50℃ (22 min) 和 60℃ (14 min) 的微波处理条件,可以使寄生曲霉孢子数量下降 6 个对数周期^[3]。

然而,不适当的加热工艺可能会对玉米的品质产生较大损伤,从而影响玉米的使用价值。朱德文等研究表明,随着微波干燥功率、温度和风速的提高,发芽率和淀粉得率下降,裂纹率升高^[4]。张玉荣等研究表明,热风干燥温度高于 75℃、干燥速率大于 4.65% /h 时,玉米电导率急剧升高,丙二醛(MDA)含量、脂肪酸值增加,过氧化物酶(POD)活力下降^[5]。Singh 等认为较高温度的干燥对淀粉得率有显著的影响,不当的干燥温度甚至可使淀粉得率减小 30% 以上^[6]。另外,玉米初始含水率对干燥过程中的品质变化也有影响^[5]。

本文对不同含水率玉米样品采用 50℃ (22 min)、60℃ (18 min) 和 70℃ (14 min) 的微波处理后,选取和测定种子品质和加工品质 13 项品质指标,通过因子分析探求玉米品质评价中的主要影响因素,构建玉米品质的科学评价体系,为不同初始含水率的玉米样品筛选合理的微波灭霉处理参数提供参考。

1 材料与方

1.1 试验测控系统

试验所用微波恒温加热灭霉装置由格兰仕牌微波炉改制而成,微波工作频率为 2 450 MHz,最大输出功率为 800 W,系统硬件框架如图 1 所示。本装置通过调节交流电功率来调节微波发射功率,从而实现恒温控制^[7]。在温控系统中,红外传感器测定的物料温度经转换模块输入到单片机中,基于实测温度和设定温度的差值,利用 PID 算法对温度偏差做运算处理,将运算得到的控制量输给执行机构——双向可控硅,控制其导通时间,调节交流电功率,从而实现微波对玉米样品的恒温加热控制。

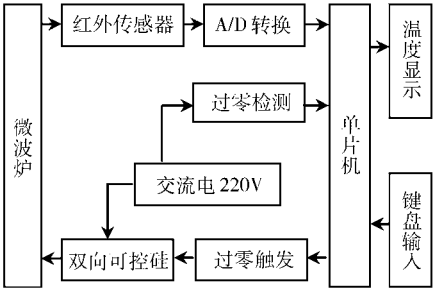


图 1 试验测控系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of test and control system of experiment

1.2 材料

玉米贮藏的安全含水率为 13%,而玉米收获后含水率较高,可达 22% ~ 26%。本文采用新收获的农华 101 玉米籽粒,含水率为 23.5%,因此选择含水率为 13% ~ 24% 的玉米进行测定。玉米籽粒塑料袋密封使其霉变,然后自然晾干,使其含水率分别为 13.8%、18.4% 和 22.6%。

1.3 主要仪器和试剂

TU-1901 型紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器制造有限责任公司);BSA124S 型电子天平(北京赛多利斯科学仪器有限公司);FE20K 型 pH 计(上海梅特勒-托利多仪器有限公司);HWS-26 型电热恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司);DDS-11 A 型电导率仪(上海虹益仪器仪表有限公司);RVA-3D 型快速黏度分析仪(澳大利亚 Newport Scientific 公司)。

直链淀粉、支链淀粉标准样品购于 Sigma 公司;氢氧化钾、盐酸、氢氧化钠、碘、碘化钾等试剂均为分析纯。

1.4 试验方法

1.4.1 玉米样品的微波加热工艺参数

不同初始含水率玉米样品的微波加热工艺参数如表 1 所示。

表 1 玉米样品的微波加热工艺参数

Tab. 1 Microwave processing parameters of maize

样品	初始含水率/%	加热温度/℃	时间/min
X1	13.8	50	22
X2	18.4	50	22
X3	22.6	50	22
X4	13.8	60	18
X5	18.4	60	18
X6	22.6	60	18
X7	13.8	70	14
X8	18.4	70	14
X9	22.6	70	14

1.4.2 微波处理玉米品质的测定

含水率测定:参照 GB/T 5497—2008 方法。

裂纹率测定:采用放大镜观测法^[5]。

发芽率测定:参照 GB/T 5520—2011 方法。

生活力测定:玉米样品在蒸馏水中浸泡 2 h,取出 50 粒,用刀片沿其胚部中部纵向切开,放入试管中,加质量分数为 0.5% 的红四氮唑到试管内,使玉米全部浸到液面下,恒温箱中 30℃ 保温 30 min(反应时试管要避光),观察胚部显色情况^[8]。

脂肪酸值测定:参照 GB/T 15684—1995 方法。

电导率测定:将玉米籽粒分样筛选,从中选出完好无损,无畸形的籽粒,取出 150 粒,分成 3 组,每组 50 粒,分别称量,样品用蒸馏水冲洗 2 次,再用超纯水冲洗 1 次,用滤纸吸干浮水,放入 100 mL 具塞三角瓶中,加入 50 mL 超纯水,于 25℃ 培养箱中 24 h 后用电导率仪测定其电导率。同时测超纯水电导率,扣除空白^[8]。

总淀粉、直链淀粉和支链淀粉测定:采用双波长法,总淀粉含量为直链淀粉与支链淀粉含量之和^[9]。

糊化特性和黏度特性测定:采用快速黏度仪测定法^[10]。测定过程中罐内温度变化如下:50℃ 保持 1 min,以 12℃/min 上升到 95℃ (3.75 min),95℃ 保持 2.5 min,以 12℃/min 下降到 50℃ (3.75 min),50℃ 保持 2 min。搅拌器在起始 10 s 内转动速度为 960 r/min,以后保持在 160 r/min。根据计算机屏幕显示的黏度变化曲线,记录糊化温度、峰值黏度、峰值时间、谷值黏度、终值黏度、衰减值和回升值。黏度值用 cp(RVA 黏度单位)表示。

1.5 数据与统计分析

数据分析采用 SPSS 16.0 软件的 Factor Analysis 和 Microsoft Excel 软件进行。

因子分析的主要步骤为:①将选取的参评指标变量建立原始数据矩阵。②将原始数据矩阵标准化。③确定初始因子载荷矩阵,依据特征值大于或等于 1 选取主因子,为了使因子所表达的意义更直观,运用 Varimax 旋转法对初始因子进行旋转,根据最终因子载荷矩阵,对各主因子进行解释。④计算不同微波处理的因子得分值,并以因子贡献率为权重计算每个微波处理玉米品质的综合得分及排名。⑤根据玉米品质的排名筛选适宜的微波处理条件。

用于统计分析的数据为不同微波条件处理的玉米品质指标的平均数据。因子分析中,使用隶属函数法对数据进行标准化转换^[11]。正相关指标(发芽率、生活力、总淀粉、支链淀粉和峰值黏度)计算

式为

$$U_{in} = \frac{X_{in} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \tag{1}$$

式中 U_{in} ——第 n 个样品第 i 个正相关指标的原始数据经转换后的隶属函数值

X_{in} ——第 n 个样品第 i 个指标的原始测定结果

X_{imax} 、 X_{imin} ——样品组中第 i 个指标的最大和最小值

负相关指标(裂纹率、电导率、脂肪酸值、直链淀粉、崩解值、回升值、峰值时间和糊化温度)计算式为

$$U'_{in} = 1 - \frac{X_{in} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \tag{2}$$

式中 U'_{in} ——第 n 个样品第 i 个负相关指标的原始数据经转换后的隶属函数值

使用 SPSS 16.0 软件进行因子分析,得到各样品的公因子分值 F_{jn} ,综合分值计算式为

$$D_n = \sum_{j=1}^m F_{jn} E_j \tag{3}$$

式中 D_n ——因子分析法得到的各玉米样品品质的综合分值

F_{jn} ——第 n 个样品第 j 个特征根大于 1 的公因子的分值

m ——特征根大于 1 的公因子个数

E_j ——第 j 个公因子的方差贡献率

2 结果与分析

2.1 微波处理玉米品质的测定与结果分析

为了综合评价微波处理玉米的品质,需要对玉米品质指标进行筛选。朱德泉等选取裂纹率、发芽率和淀粉得率作为评价指标研究微波干燥对玉米品质的影响^[4];张玉荣等认为热风干燥玉米的关键评价指标为裂纹率、脂肪酸值、POD 活力、MDA 含量和电导率,真空干燥玉米的关键评价指标为裂纹率、发芽率、POD 活力和电导率^[5];肖红伟等综述了干燥对玉米饲用和加工品质的影响的指标,提出的评价指标主要有裂纹率、醇溶蛋白、玉米淀粉色泽、直链和支链淀粉含量、淀粉结晶性能、淀粉黏度特性、淀粉糊化特性和玉米中淀粉、脂肪、氨基酸、纤维素等含量^[12]。本文选取裂纹率、发芽率、生活力、电导率、脂肪酸值、总淀粉含量、直链和支链淀粉含量、玉米黏度特性(包括峰值黏度、崩解值、回升值、峰值时间等测定指标)、玉米糊化性能等指标对玉米品质进行评价,能够较为全面地反映玉米的种子品质和加工品质。

对不同微波条件处理玉米的品质测定值如表 2

表 2 玉米品质测定结果

Tab.2 Testing results of maize quality

样品	裂纹率 $Y_1/\%$	发芽率 $Y_2/\%$	生活力 $Y_3/\%$	电导率 $Y_4/$ $\mu\text{S}\cdot(\text{cm}\cdot\text{g})^{-1}$	脂肪酸值 $Y_5/$ $\text{mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}$	总淀粉 $Y_6/\%$	直链淀粉 $Y_7/\%$	支链淀粉 $Y_8/\%$	峰值黏度 Y_9/cp	崩解值 Y_{10}/cp	回升值 Y_{11}/cp	峰值时间 Y_{12}/min	糊化温度 $Y_{13}/^\circ\text{C}$
X1	10	96	90	8.8	42.4	60.83	12.68	48.15	1 536	877	636	4.13	71.80
X2	15	88	98	8.8	46.5	69.28	15.32	53.96	1 013	644	343	3.93	71.85
X3	28	90	100	8.4	45.3	70.03	14.10	55.93	1 306	839	456	4.00	71.00
X4	14	91	98	10.4	42.7	68.36	13.93	54.43	1 676	993	705	4.13	71.90
X5	21	84	99	10.9	50.2	70.40	14.81	55.59	1 045	671	349	4.00	71.70
X6	35	65	98	9.2	51.8	74.01	14.47	59.54	1 895	1 154	757	3.93	70.15
X7	16	58	100	9.5	45.4	70.50	14.91	55.59	1 801	1 052	775	4.13	71.90
X8	24	22	98	9.5	53.8	66.64	14.54	52.10	1 064	705	356	3.93	70.95
X9	40	1	69	13.3	61.6	65.86	13.06	52.80	833	478	336	3.93	71.90

所示。由表 2 可以看出,若以某单一品质指标进行排序,不同指标中样品的排列顺序不尽相同,对上述玉米样品进行品质选优,必须依据样品在 13 项品质指标中的综合表现。

2.2 玉米品质的因子分析

因子分析法是主成分分析法的扩展。它是研究以最少的信息丢失,将众多原始变量浓缩成少数几个因子变量,以及使因子变量具有较强的可解释性的一种多元统计分析方法。其特点是命名清晰性高,应用上侧重成因清晰性的综合评价^[13]。

原始数据经隶属函数法转换后进行因子分析。表 3 中给出了经主成分分析法提取的各因子的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率。可以看出,只有前 4 个因子的特征根大于 1,因此 SPSS 提取前 4 个因子,它们累积方差贡献率为 94.45%,即这 4 个公因子所含信息占总体信息的 94.45%,因此利用因子分析法评价玉米品质是可靠的,且在尽可能保持原始信息的基础上达到了降维简化的目的。

表 3 总方差分解

Tab.3 Total variance explained

公因子	相关矩阵的特征值 和方差贡献率			旋转后的特征值 和方差贡献率		
	特征 值	方差 贡献 率/%	累积方 差贡献 率/%	特征 值	方差 贡献 率/%	累积方 差贡献 率/%
1	5.57	42.85	42.85	3.88	29.83	29.83
2	3.67	28.22	71.07	3.53	27.16	56.99
3	2.01	15.45	86.52	2.96	22.73	79.72
4	1.03	7.93	94.45	1.92	14.73	94.45
5	0.48	3.66	98.10			
6	0.14	1.10	99.20			
7	0.09	0.71	99.91			
8	0.01	0.09	100			

对初始因子载荷矩阵(略)进行方差最大正交旋转,使因子和原始变量间的关系进行重新分配,以

使得因子更加容易解释。由表 3 可知,旋转后 4 个公因子的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率均发生了变化,但特征值和方差贡献率仍然会保持从大到小的顺序,而且前 4 个因子的累积方差贡献率仍然为 94.45%,和旋转前完全相同。

旋转后的因子载荷矩阵如表 4 所示。载荷在统计意义上指公因子与性状变量的相关系数,旋转后各因子中的载荷值趋于两极分化,各因子具有较明显的生物学意义。由表 3 和表 4 可知,第 1 公因子中在电导率、脂肪酸值、发芽率、生活力和裂纹率等指标上有较大载荷,主要反映的是玉米的生理生化特性,因此称为生理生化因子,方差贡献率为 29.83%;第 2 公因子中回升值、峰值黏度、崩解值和峰值时间的载荷值较大,称为玉米的黏度特性因子,方差贡献率为 27.16%;第 3 公因子中载荷值较大的指标是玉米的总淀粉、直链淀粉和支链淀粉含量,称为淀粉含量及组成因子,方差贡献率为 22.73%;第 4 公因子中玉米淀粉糊化温度的载荷值最大,称为糊化特性因子,方差贡献率为 14.73%。

表 4 旋转后因子载荷矩阵

Tab.4 Rotated component matrix

性状	公因子			
	1	2	3	4
电导率	0.873	0.184	0.048	0.385
脂肪酸值	0.861	0.392	-0.068	-0.262
发芽率	0.812	0.236	0.064	-0.156
生活力	0.794	0.185	0.502	0.124
裂纹率	0.791	0.098	-0.198	-0.520
回升值	-0.153	-0.976	-0.038	0.037
峰值黏度	0.248	0.947	0.134	0.113
崩解值	-0.324	-0.898	-0.219	-0.182
峰值时间	-0.336	-0.614	0.302	0.589
总淀粉	-0.042	0.193	0.947	0.227
支链淀粉	-0.143	0.290	0.882	0.271
直链淀粉	-0.337	0.221	-0.867	0.005
糊化温度	-0.011	0.204	0.263	0.932

2.3 玉米品质的综合评价

采用回归方法求得因子得分函数。因子得分系数矩阵如表 5 所示,由系数矩阵将 4 个公因子表示为 13 个指标的线性形式。

表 5 因子得分系数矩阵

Tab.5 Component score coefficient matrix

性状	公因子			
	1	2	3	4
发芽率	0.223	-0.040	0.008	-0.023
裂纹率	0.204	-0.064	-0.003	-0.212
生活力	0.234	-0.081	0.132	0.055
电导率	0.335	-0.093	-0.159	0.390
脂肪酸值	0.209	0.017	-0.031	-0.062
总淀粉	-0.083	0.040	0.370	-0.122
直链淀粉	-0.091	0.161	-0.384	0.195
支链淀粉	0.091	0.092	0.332	-0.091
峰值黏度	-0.059	0.298	-0.017	0.039
崩解值	0.020	-0.262	0.001	-0.078
回升值	0.112	-0.333	0.011	0.059
峰值时间	0.034	-0.201	0.014	0.318
糊化温度	0.082	0.027	-0.153	0.597

第 n 个样品第 1 公因子(生理生化特性因子)的分值为

$$F_{1n}=0.223U'_{1n}+0.204U_{2n}+0.234U_{3n}+0.335U'_{4n}+0.209U'_{5n}-0.083U_{6n}-0.091U'_{7n}+0.091U_{8n}-0.059U_{9n}+0.020U'_{10n}+0.112U'_{11n}+0.034U'_{12n}+0.082U'_{13n}$$

(4)

第 n 个样品第 2 公因子(黏度特性因子)的分值为

$$F_{2n}=-0.040U'_{1n}-0.064U_{2n}-0.081U_{3n}-0.093U'_{4n}+0.017U'_{5n}+0.040U_{6n}+0.161U'_{7n}+0.092U_{8n}+0.298U_{9n}-0.262U'_{10n}-0.333U'_{11n}-0.201U'_{12n}+0.027U'_{13n}$$

(5)

第 n 个样品第 3 公因子(淀粉含量及组成因子)的分值为

$$F_{3n}=0.008U'_{1n}-0.003U_{2n}+0.132U_{3n}-0.159U'_{4n}-0.031U'_{5n}+0.370U_{6n}-0.384U'_{7n}+0.332U_{8n}-0.017U_{9n}+0.001U'_{10n}+0.011U'_{11n}+0.014U'_{12n}-0.153U'_{13n}$$

(6)

第 n 个样品第 4 公因子(淀粉糊化特性因子)的分值为

$$F_{4n}=-0.023U'_{1n}-0.212U_{2n}+0.055U_{3n}+0.390U'_{4n}-0.062U'_{5n}-0.122U_{6n}+0.195U'_{7n}-0.091U_{8n}+0.039U_{9n}-0.078U'_{10n}+0.059U'_{11n}+0.318U'_{12n}+0.597U'_{13n}$$

(7)

不同玉米样品 4 个公因子的得分及综合分值如表 6 所示。玉米生理生化特性因子得分最高的依次为 X2、X1、X3,表明微波处理条件为 50℃,22 min 时,由于热损伤较小,玉米样品的种子品质最好;X6 的淀粉含量及组成因子、黏度特性因子、糊化特性因子得分均排在第一位,表明其加工品质最好;X9 的 4 个公因子得分均为负值,表明其种子品质和加工品质都较差。由于各公因子在因子分析时的方差贡献率不同,所以在进行品质综合评价时,还要结合因子贡献率,协调好各公因子之间的侧重关系。以公因子贡献率为权重,计算各样品 4 个公因子的分值与相应权重之积的累加和,得到综合分值 D_n ,9 份微波处理玉米样品品质的综合排序为: X6、X7、X3、X4、X2、X5、X1、X8、X9。由此可以看出,微波处理条件为 60℃,18 min 时,初始含水率为 22.6% 的玉米的综合品质最好;而微波处理条件为 70℃,14 min 时,初始含水率为 22.6% 的玉米的综合品质最差。这之前分析的结果基本吻合,此评价模型基本上能反映出微波处理后玉米的品质。从评价的结果看,不同微波条件处理玉米的品质变化是玉米初始含水率、微波处理温度和处理时间共同作用的结果,这与张玉荣等对热风 and 真空干燥后玉米品质的评价结果一致^[5]。

本文中,当玉米初始含水率为 13.8%、18.4% 和 22.6% 时,分别采用 70℃(14 min)、50℃(22 min) 和 60℃(18 min) 的微波处理条件较为合理。

表 6 微波处理玉米品质综合评价

Tab.6 Synthetical evaluation of maize treated by microwave

样品	微波条件/℃(min)	含水率/%	F_{1n}	F_{2n}	F_{3n}	F_{4n}	D_n	排名
X1	50(22)	13.8	0.864	0.525	-2.228	-0.056	-0.114	7
X2		18.4	0.957	-1.351	0.611	-0.306	0.012	5
X3		22.6	0.621	-0.178	0.097	0.898	0.291	3
X4	60(18)	13.8	0.204	0.985	0.033	-1.106	0.173	4
X5		18.4	0.084	-0.818	0.874	-0.731	-0.106	6
X6		22.6	-0.483	1.294	0.883	1.728	0.663	1
X7	70(14)	13.8	0.045	1.120	0.733	-1.084	0.325	2
X8		18.4	0.087	-0.958	-0.322	1.022	-0.157	8
X9		22.6	-2.379	-0.619	-0.682	-0.364	-1.086	9

3 讨论

3.1 正、负相关指标的定义和原始数据的转换

对所测定各项指标正、负相关性的定义是根据玉米的种子品质和加工品质而定的。

干燥和冷却是玉米产生应力裂纹的重要原因。一般来说,裂纹率高的玉米在进一步输送中更容易产生破损,从而增加不完善粒,因此文中将其定义为负相关指标。

在干燥和储藏期间,玉米中脂质在脂酶作用下发生水解产生大量的游离脂肪酸,使脂肪酸值升高。不饱和游离脂肪酸和脂质易发生氧化和过氧化作用,导致玉米品质的劣化。脂质是细胞膜的主要组成部分,脂质的氧化必然造成细胞膜系统的破坏,电解质会不同程度外渗,从而导致电导率提高。玉米籽粒细胞膜系统的破坏,使玉米生理代谢不能正常进行,最终导致玉米发芽率和生活力等生理活性的降低^[14]。发芽率和生活力反映了玉米生命力的强弱。因此,将发芽率、生活力定义为正相关指标,而将脂肪酸值和电导率定义为负相关指标。

玉米的加工大多先制淀粉,同时提取胚芽油,然后再对玉米淀粉进行改性处理、发酵等操作以获取变性淀粉和酒精^[12]。直链淀粉和支链淀粉的含量比例是影响淀粉糊化特性的主要因子。直链淀粉空间位阻小,在热糊冷却过程中能自动地平行排列,分子间易于通过氢键而形成微晶束而老化;而支链淀粉空间位阻大,分子难以运动,形成的氢键少,不易老化,溶液能较好地保持稳定状态,具有好的流动性^[15]。因此将总淀粉、支链淀粉含量定义为正相关指标,而将直链淀粉定义为负相关指标。

试样加热后,黏度开始增加时的温度称为起始糊化温度,试样达到峰值黏度的时间称为峰值时间。峰值黏度是加热使试样糊化后和在冷却前达到的最大值,反映淀粉的膨胀能力和结合水的能力。淀粉糊化温度越低,峰值时间越短,峰值黏度越大,表明淀粉膨胀容易,可以在最短时间达到糊化,吸水保水能力越强。崩解值是峰值黏度与谷值黏度的差值,崩解值反映淀粉的热糊稳定性,崩解值小,热糊稳定性高。回升值是谷值黏度与终值黏度的差值,回升值反映了淀粉糊低温下老化的趋势或冷糊的稳定性,回升值越小,冷糊稳定性越好,不易老化^[16]。因此将峰值黏度定义为正相关指标,将峰值时间、崩解值、回升值和糊化温度定义为负相关指标。

由于原始指标测定的是不同的品质指标,其计量单位不同,所以数据的量纲也不一致。张玉荣等对大米的食味品质进行评价时,使用标准差标准化

法对数据进行了转换^[17];张海英等使用0~1极差标准化法对桃果实品质数据进行了转换^[18];然而在玉米品质分析中,有些品质指标对综合品质评价有负影响,如电导率、脂肪酸值、回升值等,因此对原始数据的转换还要考虑指标对评价体系的正、负影响。表7列出了不同微波条件处理的玉米品质数据在采用标准差标准化、0~1极差标准化法和隶属函数法^[7]转换后,进行因子分析得到的综合评价顺序。结果表明,标准差标准化和0~1极差标准化法转换的数据得到的排列顺序相同,回升值最大、峰值时间最长和糊化温度最高的X7号排在首位,这显然与选优目标相悖;而隶属函数法考虑到对综合评价有负影响的指标,因此使结果更为客观、合理。

表 7 数据转换方式对综合评价的影响
Tab.7 Effect of data conversion methods on
synthetical evaluation

数据转换方式	综合得分排名
标准差标准化	X7, X4, X6, X5, X2, X3, X1, X8, X9
0~1 极差标准化	X7, X4, X6, X5, X2, X3, X1, X8, X9
隶属函数法	X6, X7, X3, X4, X2, X5, X1, X8, X9

3.2 玉米品质评价的因子分析

因子分析结果表明,影响玉米品质综合评价的关键因子依次为:玉米的生理生化特性、黏度特性、淀粉含量及组成、糊化特性。第1公因子(生理生化特性)主要反映了玉米的种子品质,玉米的发芽率、生活力、电导率、脂肪酸值均受第1公因子支配,说明玉米热处理后脂质氧化,脂肪酸值升高,引起质膜损伤,电导率增加,是发芽率、生活力下降的主要原因。

由于对玉米加工主要是利用其淀粉或者对淀粉进一步深加工,因此公因子2(黏度特性)、公因子3(淀粉含量及组成)、公因子4(糊化特性)综合反映了玉米的加工品质。淀粉的糊化特性、黏度特性与淀粉中直支链淀粉含量以及颗粒特性有关。淀粉糊化的本质是淀粉粒微晶束的熔解,水分子进入淀粉粒内部拆散淀粉链原有的缔合状态,从而形成高度水合的体系,在分子水平上,涉及到淀粉晶体中胶束状支链淀粉双螺旋分子结构的解旋和分散,以及直链淀粉分子从淀粉粒中的释放等过程^[11]。梁丽松等研究表明直链淀粉含量越高,板栗淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度和崩解值等越低,而回升值和糊化温度越高和峰值时间越长^[11]。一般来说,直链含量高、结晶度高、支链外链较长的淀粉晶体结构紧密,晶体熔解所需热量大,导致糊化温度较高。程科等研究认为,尽管糯米的直链淀粉含量很少,但通常糯米淀粉的分子量较粳米和籼米的大很多,且当

支链淀粉外链较长时,也可能形成较紧密的双螺旋结构,导致糊化温度较粳米淀粉高^[19]。本文中,玉米淀粉含量及其组成与峰值黏度、峰值时间、崩解值、回升值和糊化温度也存在着相似的相关性(表 2)。

值得提出的是,尽管许多文献将糊化温度归为黏度特性指标,但峰值黏度、峰值时间、崩解值、回升值隶属于第 2 公因子(黏度特性),4 项指标的方差贡献率为 27.16%,而糊化温度方差贡献率为 14.73%,受第 4 公因子(糊化特性)单独支配,说明糊化温度与黏度特性反映了玉米品质的不同方面,具有相互独立性和不可替代性。

3.3 玉米品质的综合评价与最优微波处理条件的选择

在进行多指标综合评价时,由于要求评价结果客观全面,就需要从各个方面用多个指标进行测量,但这样就使得观测指标间存在信息重叠,同时还存在不同评价指标累加时确定权重系数以及量纲不同等问题。为此,通常希望用较少的新指标代替原来较多的旧变量,同时要求这些新指标尽可能地反映原变量的信息^[20]。本研究主要从种子品质和加工品质的角度对玉米品质进行综合评价,利用因子分析法提取 4 个公因子代替 13 个原始指标,构造的数学评价模型有效地保留了测定指标的大部分信息(94.45%),计算了不同微波条件处理玉米样的综合分值 D_n ,排列顺序反映了各样品综合性状的优劣程度,有效地减小了人为因素造成的误差,大大提高了评价的可靠性和科学性。

由于不同微波条件处理玉米的品质变化是玉米初始含水率、微波处理温度和处理时间共同作用的结果,因此对霉变玉米微波灭霉时,为了尽可能地降低霉菌含量,同时又不使玉米品质发生劣变,需要根

据玉米不同的初始含水率选择不同的微波处理条件。本文中,当玉米初始含水率为 13.8%、18.4% 和 22.6% 时,采用 70℃(14 min)、50℃(22 min) 和 60℃(18 min) 的微波处理条件较为合理。

3.4 工业化生产应用分析说明

微波恒温灭菌设备已经在粉状保健品的干燥杀菌、茶叶和中药材的杀虫防霉等领域得以工业化应用。能耗是评定杀菌工艺的一个重要指标^[21]。应用实验型微波恒温加热灭霉装置对加热过程智能控制,首先使玉米快速达到设定温度(60℃),在随后的保温阶段(18 min) 为小功率间隙加热,能耗为 0.72 kJ/g,即对 1 kg 霉变玉米微波灭霉折合耗电成本约为 0.1 元,因此能耗较低。而且,玉米含菌量越高,相同温度下需要的灭菌时间越长,采用的微波灭霉工艺参数是针对高度发霉的玉米样品,若结合紫外线、臭氧杀菌等手段对高霉玉米预杀菌或者杀菌对象为低度霉变的玉米物料,可大大缩短微波杀菌时间,从而进一步降低能耗水平。紫外线、臭氧与微波组合杀菌的后续研究正在进行中。

4 结论

(1)隶属函数法同时考虑到玉米不同品质指标对评价体系的正、负影响,采用该法转化的数据适于进行因子分析。

(2)影响玉米品质综合评价的因子依次是生理生化因子、黏度特性因子、淀粉含量及组成因子和糊化特性因子。

(3)不同微波条件处理玉米的品质变化是玉米初始含水率、微波处理温度和处理时间共同作用的结果。因此对霉变玉米微波灭霉时,需要根据玉米不同的初始含水率选择不同的微波处理条件。

参 考 文 献

- 周韵,宋春芳,崔政伟.热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J].农业工程学报,2011,27(2):382~386.
Zhou Yun, Song Chunfang, Cui Zhengwei. Coupled hot air and microwave drying technology for carrot slices dehydration[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(2):382~386. (in Chinese)
- Lakins D G, Echeverry A, Alvarado C Z, et al. Quality of and mold growth on white enriched bread for military rations following directional microwave treatment [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(3): 99~103.
- 靳志强,王顺喜,韩培.微波杀灭霉变玉米中寄生曲霉的动力学模型[J].农业机械学报,2011,42(12):148~153.
Jin Zhiqiang, Wang Shunxi, Han Pei. Model of inactivation kinetics of *Aspergillus parasiticus* in mouldy maize by microwave processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 148~153. (in Chinese)
- 朱德泉,王继先,朱德文.玉米微波干燥特性及其对品质的影响[J].农业机械学报,2006,37(2):73~76.
Zhu Dequan, Wang Jixian, Zhu Dewen. Experimental study on characteristics of microwave drying of maize grain and its effects on grain quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 73~76. (in Chinese)
- 张玉荣,周显青.热风和真空干燥玉米的品质评价与指标筛选[J].农业工程学报,2010,26(3):346~352.
Zhang Yurong, Zhou Xianqing. Quality evaluation and parameter selection of maize by hot-air and vacuum drying[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 346~352. (in Chinese)
- Singh V, Haken A E, Paulsen M R, et al. Starch yield sensitivity of maize hybrids to drying temperature and harvest moisture content[J]. Starch,1997,50(5):181~183.

- 7 孙长岭, 张茂青, 张婷姝, 等. 微波炉恒温控制系统的研究[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2010, 30(3): 36~39.
Sun Changling, Zhang Maoqing, Zhang Tingshu, et al. Study on the thermostat of microwave oven [J]. Journal of Soochow University: Engineering Science Edition, 2010, 30(3): 36~39. (in Chinese)
- 8 张玉荣, 周显青, 张勇. 储存玉米膜脂过氧化与生理指标的研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3 410~3 414.
Zhang Yurong, Zhou Xianqing, Zhang Yong. Research on membrane lipid peroxidation and physiological parameters of storage maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3 410~3 414. (in Chinese)
- 9 金玉红, 张开利, 张兴春, 等. 双波长法测定小麦及小麦芽中直链、支链淀粉含量[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(1): 137~140.
Jin Yuhong, Zhang Kaili, Zhang Xingchun, et al. Determination of amylose and amylopectin in wheat and wheat malt by dual-wavelength spectrophotometry [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(1): 137~140. (in Chinese)
- 10 梁丽松, 徐娟, 王贵禧, 等. 板栗淀粉糊化特性与淀粉粒粒径及直链淀粉含量的关系[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 251~260.
Liang Lisong, Xu Juan, Wang Guixi, et al. Relationship between starch pasting, amylose content and starch granule size in different chinese chestnut variety groups[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 251~260. (in Chinese)
- 11 马庆华, 李永红, 梁丽松, 等. 冬枣优良单株果实品质的因子分析与综合评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2 491~2 499.
Ma Qinghua, Li Yonghong, Liang Lisong, et al. Factor analysis and synthetical evaluation of the fruit quality of Dongzao (Ziziphus jujuba Mill. 'Dongzao') advanced selections [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12): 2 491~2 499. (in Chinese)
- 12 肖红伟, 高振江. 干燥对玉米饲用和加工品质影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 290~295.
Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang. Research progress in the effects of drying on feeding maize and processing quality [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 290~295. (in Chinese)
- 13 王芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料对渭北旱塬耕地土壤短期培肥效应的综合评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 930~936.
Wang Fang, Zhang Jinshui, Gao Pengcheng, et al. Short term effect of applying organic materials in improving soil fertility of Weibei rainfed highland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 930~936. (in Chinese)
- 14 周显青, 张玉荣, 张勇. 储藏玉米陈化机理及挥发物与品质变化的关系[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 242~246.
Zhou Xianqing, Zhang Yurong, Zhang Yong. Ageing mechanism of stored maize and the relationship between its volatile components and quality [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 242~246. (in Chinese)
- 15 杜双奎, 于修焯, 问小强, 等. 红小豆淀粉理化性质研究[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 92~95.
Du Shuangkui, Yu Xiuzhu, Wen Xiaoqiang, et al. Physicochemical properties of red bean starch[J]. Food Science, 2007, 28(12): 92~95. (in Chinese)
- 16 张琦琦, 孙鑫森, 石瑛, 等. 马铃薯淀粉制备条件对淀粉主要品质特性的影响[J]. 中国马铃薯, 2009, 23(1): 15~19.
Zhang Qiqi, Sun Xinmiao, Shi Ying, et al. The effect of preparation conditions on quality characteristics of potato starch[J]. Chinese Potato, 2009, 23(1): 15~19. (in Chinese)
- 17 张玉荣, 张秀华, 周显青, 等. 主成分分析法综合评价大米的食味品质[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2008, 29(5): 1~5.
Zhang Yurong, Zhang Xiuhua, Zhou Xianqing, et al. The comprehensive evaluation of rice eating qualities by principal component analysis [J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 29(5): 1~5. (in Chinese)
- 18 张海英, 韩涛, 王有年, 等. 桃果实品质评价因子的选择[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 235~239.
Zhang Haiying, Han Tao, Wang Younian, et al. Selection of factors for evaluating peach (*Prunus persica*) fruit quality [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 235~239. (in Chinese)
- 19 程科, 陈季旺, 许永亮, 等. 大米淀粉物化特性与糊化曲线的相关性研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(6): 4~9.
Cheng Ke, Chen Jiawang, Xu Yongliang, et al. The relationship between physicochemical property and pasting curve of rice starch [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(6): 4~9. (in Chinese)
- 20 宇传华. SPSS 与统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- 21 朱德文, 岳鹏翔, 袁弟顺, 等. 微波远红外耦合杀青工艺对绿茶品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 345~350.
Zhu Dewen, Yue Pengxiang, Yuan Dishun, et al. Effects of microwave far-infrared coupling fixation processes on quality of green tea[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 345~350. (in Chinese)