

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.033

基于分段加湿法的待发芽糙米臭氧水预处理工艺优化

邱 硕 贾富国 韩燕龙 蒋龙伟 曾 勇
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 糙米吸湿发芽过程中微生物繁殖给发芽糙米带来安全隐患。为保障发芽糙米的安全性,研究基于分段加湿法的臭氧水灭菌预处理待发芽糙米工艺。以分段加湿后糙米为原料,研究糙米含水率、臭氧水初始质量浓度、臭氧水处理时间、臭氧水温度对灭菌率和发芽率的影响规律。采用二次正交旋转中心组合设计进行试验,建立了各因素对灭菌率和发芽率影响的数学模型。结果表明灭菌率、发芽率与各参数间回归方程极显著($P < 0.01$),优化参数组合为糙米含水率 27.5%、臭氧水初始质量浓度 4.7 mg/L、臭氧水处理时间 6.5 min、臭氧水温度 29.5℃,该条件下灭菌率和发芽率分别为 $(97.49 \pm 0.11)\%$ 和 $(91.89 \pm 0.26)\%$ 。与分段加湿后无灭菌处理相比,臭氧水预处理后发芽糙米菌落菌体浓度降低约 5.20 lg CFU/g,发芽率和 γ -氨基丁酸含量分别提高约 0.49% 和 1.23 mg/(100 g)。研究证实优化后的预处理工艺既可有效灭菌又有利于糙米发芽。

关键词: 发芽糙米;臭氧水;灭菌率;发芽率; γ -氨基丁酸

中图分类号: TS210.4; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0271-08

Optimization of Ozonated Water Pretreatment for Brown Rice before Germination Based on Segmented Moisture Conditioning Method

Qiu Shuo Jia Fuguo Han Yanlong Jiang Longwei Zeng Yong
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To increase moisture of brown rice before germination, traditional soaking method provides a suitable environment for the growth of microorganisms, and segmented moisture conditioning method has no proper disinfection technique, which brings potential safety hazard to germinated brown rice. Therefore, an ozonated water treatment technique was proposed to enhance safety of brown rice before and after germination. The segmented moisture conditioned brown rice was selected as raw materials, with Design-Expert 8.0.6 software, a central composite rotatable orthogonal experimental design with four factors and five levels was employed to study effect of brown rice moisture content, initial mass concentration, treatment time and temperature of ozonated water on disinfection rate in aerobic plate count and germination rate of brown rice, and mathematical models for effect of each parameters on disinfection rate in aerobic plate count and germination rate were established. The mathematical models were extremely significant and parameters were optimized to increase disinfection rate in aerobic plate count above 97% and germination rate above 90%, and brown rice moisture content of 27.5%, initial mass concentration, treatment time and temperature of 4.7 mg/L, 6.5 min and 29.5℃ were decided to be optimal levels. Under this treatment condition, actual disinfection rate in aerobic plate count and germination rate were $(97.49 \pm 0.11)\%$ and $(91.89 \pm 0.26)\%$. Compared with segmented moisture conditioning method without disinfection treatment, germinated brown rice produced with ozonated water

收稿日期: 2016-05-12 修回日期: 2016-06-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(51575098)、黑龙江省自然科学基金项目(E201322)和哈尔滨市应用技术与开发项目(2013DB2BG005)
作者简介: 邱硕(1983—),男,博士生,主要从事农产品加工与贮藏研究,E-mail: beibeiqu2014@126.com
通信作者: 贾富国(1965—),男,教授,博士,主要从事农产品加工技术与设备研究,E-mail: Jiafg301@neau.edu.cn

treatment technique had significantly reduced amount of aerobic plate counts ($P < 0.01$), and germination rate and γ -aminobutyric acid content were increased by 0.49% and 1.23 mg/(100 g). These verified that ozonated water pretreatment effectively disinfected aerobic plate count and increased germination rate of brown rice, which offered a basis for safety production of germinated brown rice.

Key words: germinated brown rice; ozonated water; disinfection; germination rate; γ -aminobutyric acid

引言

发芽糙米因富含营养和具有保健功效而受到消费者青睐^[1]。目前基于浸泡吸水的发芽糙米生产工艺尚处于技术完善期,存在微生物滋生、水溶性物质流失、污水排放及后续干燥成本增加等不足。即使以次氯酸钠浸泡糙米来延长工艺链,也只在一定程度抑制细菌繁殖,且次氯酸钠对糙米具有一定腐蚀性,影响发芽率^[2-5]。本课题组在研究糙米按需吸水规律的基础上,提出非浸泡分段加湿工艺^[6]。该工艺可促进发芽率和 γ -氨基丁酸富集,很大程度改善浸泡式工艺的不足。但该工艺缺乏成熟的灭菌技术,发芽期间仍存在微生物滋生的风险,故亟需与之适应的灭菌方法。

臭氧作为一种新型非热杀菌技术,具有广谱、高效且无污染的特点^[7-8]。国内外学者就臭氧对谷物灭菌效果和品质影响进行了一系列研究。MENDEZ 等^[9]指出臭氧对储藏小麦和稻谷的烘焙特性与蒸煮特性影响不显著;CHEN 等^[10]发现经 6.0 mg/L 臭氧处理后花生黄曲霉毒素解毒率达 65.8%,且酚类化合物含量未受显著影响。马涛等^[11]发现糙米发芽浸泡过程中臭氧对真菌与酵母菌的灭菌效果显著,但未考查对发芽率的影响;程威威等^[12]研究了包括臭氧水(2.0 mg/L)在内的 5 种糙米发芽前处理工艺,发现适当臭氧水处理利于发芽率和 γ -氨基丁酸含量提高。目前兼顾糙米发芽率及灭菌效果的臭氧处理研究未见报道。

本文利用臭氧水预处理分段加湿后糙米,采用二次正交旋转中心组合方法设计试验,研究糙米含水率、臭氧水初始质量浓度、臭氧水处理时间、臭氧水温度对灭菌率和发芽率的影响规律。旨在探究既可实现有效灭菌又有利于发芽率提升及 γ -氨基丁酸富集,同时还可适量吸水以满足发芽前含水率需求的工艺参数组合。

1 材料与方法

1.1 试验材料

糙米:试验所用稻谷品种为东农 429,2014 年 10 月收获于东北农业大学水稻研究所。试验前脱壳得糙米,精选完整无裂纹籽粒作为试验材料,测得

糙米初始含水率为 11.4%。

化学试剂:次氯酸钠溶液,天津绿涛环保科技有限公司;硫代硫酸钠、重铬酸钾,天津致远化学试剂有限公司;碘化钾、硫酸,天津天力化学试剂有限公司;平板计数琼脂培养基、氯化钠,青岛海博生物技术有限公司。

1.2 试验仪器

FC2K 型砬谷机,日本株式会社佐竹制作所; DGH-9053A 型鼓风干燥箱,上海益恒试验仪器有限公司;MS304TS 型电子分析天平,梅特勒-托利多公司;RQ-120G 型臭氧发生器,济南瑞清臭氧设备有限公司;SW-CJ-1F10 型超净工作台,苏州苏杰净化设备有限公司;YXQ-LS-75S11 型立式全自动压力灭菌锅,北京科创百方科技发展有限公司;DZKW-S-6 型恒温水浴锅,北京永光明医疗仪器有限公司;CTHI-100B 型恒温恒湿培养箱,上海施都凯仪器设备有限公司;DNP-9162 型电热恒温培养箱,上海精宏实验设备有限公司;Agilent-1100 型高效液相色谱分析仪,美国安捷伦科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 糙米样本制备

将初始含水率为 11.4% 的糙米以分段加湿法^[8]提升含水率,制备试验所需的 5 种含水率糙米样本。以每组 50 g 的样本量储备 29 组存于无菌密封袋内,以备后续试验所用。

1.3.2 臭氧水样本制备

将盛有蒸馏水(250 mL)的烧杯放置水浴锅内,将质量浓度稳定的臭氧气体通入蒸馏水中,通过调节水浴锅温度及臭氧气体质量浓度制备所需不同温度和初始质量浓度的臭氧水。臭氧水质量浓度依据 GB/T 5750.11—2006 中碘量法检测^[13],以此方法制备所需臭氧水样本组。

1.3.3 臭氧水预处理待发芽糙米

按试验设计方案将糙米(50 g/组)浸泡于盛有所需温度和初始质量浓度臭氧水的烧杯内,并控制浸泡处理时间。每组糙米样本在臭氧水预处理前已各自随机择取 500 粒用于糙米菌落数测定,臭氧水预处理后在每组糙米样本中随机另取 500 粒进行菌落数测定。

1.3.4 糙米发芽过程

将经 1.3.3 节处理后每组糙米样本均平铺于密闭无菌培养皿内(共计 29 组),置于 30℃ 电热恒温培养箱内发芽 24 h^[14]。发芽后从每组样本中随机择取 500 粒,以备后续发芽率的测定。

1.3.5 臭氧水预处理工艺试验设计

在预备试验的基础上,选择糙米含水率(x_1)、臭氧水初始质量浓度(x_2)、臭氧水处理时间(x_3)、臭氧水温度(x_4)为试验因素,以灭菌率(y_1)和发芽率(y_2)为目标函数,采用四因子五水平的二次正交旋转中心组合优化试验方法。试验的因素水平编码见表 1。

表 1 试验因素水平编码

Tab.1 Experimental factors and levels

编码	因素			
	糙米含水率	臭氧水初始质量浓度	臭氧水处理时间	臭氧水温度
	$x_1/\%$	$x_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	x_3/min	$x_4/^\circ\text{C}$
-2	22.0	2.45	3.0	15
-1	23.5	3.20	4.5	20
0	25.0	3.95	6.0	25
1	26.5	4.70	7.5	30
2	28.0	5.45	9.0	35

1.4 试验指标测定

1.4.1 灭菌率

菌落总数依据文献[15]的方法测定。菌落匀液稀释 10⁴ 倍培养,将氯化钠溶液移入无菌培养皿内作空白对照,灭菌率计算公式为

$$y_1 = (N_0 - N)/(N_0 - N') \times 100\%$$
 (1)

式中 y_1 ——灭菌率,%
 N ——臭氧水预处理前糙米菌落菌体浓度,lg CFU/g
 N_0 ——臭氧水预处理后糙米菌落菌体浓度,lg CFU/g
 N' ——对照组菌落菌体浓度,lg CFU/g

1.4.2 发芽率

试验中糙米发芽率测定参照王京厦^[16]的方法,计算公式为

$$y_2 = N_1/N_2 \times 100\%$$
 (2)

式中 y_2 ——发芽率,%
 N_1 ——糙米样本发芽粒数
 N_2 ——糙米样本总粒数

1.4.3 γ -氨基丁酸含量测定

γ -氨基丁酸含量测定参照程威威等^[17]的以邻苯二甲醛(OPA)为衍生试剂的高效液相色谱(HPLC)法。

1.5 对比试验设计

将臭氧水预处理工艺与次氯酸钠预处理工艺、无灭菌处理工艺进行对比试验,处理后按 1.3.4 节方法发芽。

臭氧水预处理工艺将分段加湿至含水率为 27.5% 的糙米样本浸泡在初始质量浓度和温度分别为 4.7 mg/L 和 29.5℃ 的臭氧水中 6.5 min。

次氯酸钠预处理^[3]工艺将分段加湿至含水率为 27.5% 的糙米样本浸泡在体积分数 0.5% 的次氯酸钠中 15 min。

无灭菌处理工艺^[6]采用分段加湿法直接将糙米加湿到该工艺最适宜发芽含水率(29.2%)。

考核 3 种最优工艺条件下发芽糙米样品的菌落数、发芽率和 γ -氨基丁酸含量,重复 5 次并取平均值。

1.6 数据处理

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对中心组合试验数据处理与分析,采用 SPSS 22.0 软件进行对比试验数据的显著性分析。

2 结果与分析

2.1 试验结果

臭氧水预处理待发芽糙米工艺的试验方案与结果见表 2。

2.2 回归方程的建立与显著性分析

对灭菌率和发芽率试验值进行统计分析,得到回归方程为

$$y_1 = -182.1471 + 5.8696x_1 + 38.2563x_2 + 22.4931x_3 + 0.4590x_4 - 0.0930x_1^2 - 3.0588x_2^2 - 0.5897x_3^2 - 0.0255x_4^2 - 0.2939x_1x_2 - 0.0942x_1x_3 + 0.0573x_1x_4 - 0.9128x_2x_3 + 0.3732x_2x_4 - 0.2696x_3x_4$$
 (3)

$$y_2 = 214.6602 - 10.6555x_1 - 0.3257x_2 + 1.4330x_3 - 1.2913x_4 + 0.2114x_1^2 - 0.2233x_2^2 + 0.1231x_3^2 + 0.0112x_4^2 + 0.0811x_1x_2 - 0.0333x_1x_3 + 0.0398x_1x_4 - 0.1022x_2x_3 + 0.0383x_2x_4 - 0.0423x_3x_4$$
 (4)

方差分析与显著性检验结果分别见表 3、4。灭菌率回归方程 $P < 0.0001$,失拟项 $P = 0.1588$,决定系数 R^2 为 0.9646;发芽率回归方程 $P < 0.0001$,失拟项 $P = 0.1952$;决定系数 R^2 为 0.9673。这表明未知因子对试验结果干扰很小,回归模型的选择是合适的。检验回归系数显著性,在 $\alpha = 0.05$ 置信水平下剔除不显著项,得到优化回归方程为

$$\begin{aligned} y_1 = & -182.1471 + 5.8696x_1 + 38.2563x_2 + \\ & 22.4931x_3 + 0.4590x_4 - 3.0588x_2^2 - 0.5897x_3^2 + \\ & 0.3732x_2x_4 - 0.2696x_3x_4 \quad (5) \\ y_2 = & 214.6602 - 10.6555x_1 + 1.4330x_3 - \\ & 1.2913x_4 + 0.2114x_1^2 + 0.1231x_3^2 + 0.0112x_4^2 + \\ & 0.0398x_1x_4 - 0.0423x_3x_4 \quad (6) \end{aligned}$$

表 2 臭氧水处理工艺优化试验方案与结果

Tab.2 Optimization experiment design and results of ozonated water treatment

试验 序号	因素				灭菌率 $y_1/\%$	发芽率 $y_2/\%$
	糙米 含水率	臭氧水初始 质量浓度	臭氧水处 理时间	臭氧水 温度		
1	-1	-1	-1	-1	65.52	83.65
2	1	-1	-1	-1	67.33	86.24
3	-1	1	-1	-1	81.85	84.36
4	1	1	-1	-1	83.17	86.62
5	-1	-1	1	-1	78.23	85.95
6	1	-1	1	-1	80.00	89.12
7	-1	1	1	-1	93.15	86.32
8	1	1	1	-1	94.26	89.24
9	-1	-1	-1	1	67.74	84.72
10	1	-1	-1	1	74.06	88.62
11	-1	1	-1	1	94.35	85.36
12	1	1	-1	1	96.04	90.54
13	-1	-1	1	1	77.02	86.68
14	1	-1	1	1	79.21	89.62
15	-1	1	1	1	94.35	86.96
16	1	1	1	1	97.03	90.66
17	-2	0	0	0	81.98	85.62
18	2	0	0	0	89.16	90.85
19	0	-2	0	0	68.11	85.92
20	0	2	0	0	90.94	85.74
21	0	0	-2	0	72.44	85.52
22	0	0	2	0	89.76	89.36
23	0	0	0	-2	78.74	85.54
24	0	0	0	2	88.98	89.36
25	0	0	0	0	85.04	86.28
26	0	0	0	0	87.80	86.16
27	0	0	0	0	88.58	86.32
28	0	0	0	0	86.22	86.82
29	0	0	0	0	85.04	85.84

将不显著项平方和及自由度并入误差(剩余)项,进行第二次方差分析,灭菌率模型和发芽率模型的优化决定系数 R^2 分别为 0.929 2 和 0.934 7。回归方程极显著且拟合良好,可预测预处理后糙米灭菌率和发芽率。

由表 3 知,糙米含水率、臭氧水初始质量浓度、臭氧水处理时间和臭氧水温度对灭菌率影响显著。由表 4 知,糙米含水率、臭氧水处理时间和臭氧水温度对发芽率影响显著,臭氧水初始质量浓度对其影

表 3 灭菌率回归模型的方差分析

Tab.3 Variances analysis of regression model of disinfection rate in aerobic plate count

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 321.12	14	165.79	27.24	<0.000 1
x_1	46.07	1	46.07	7.57	0.015 6
x_2	1 516.07	1	1 516.07	249.09	<0.000 1
x_3	398.78	1	398.78	65.52	<0.000 1
x_4	134.28	1	134.28	22.06	0.000 3
x_1^2	1.14	1	1.14	0.19	0.672 2
x_2^2	76.81	1	76.81	12.62	0.003 2
x_3^2	45.68	1	45.68	7.50	0.016 0
x_4^2	10.52	1	10.52	1.73	0.209 7
x_1x_2	1.75	1	1.75	0.29	0.600 3
x_1x_3	0.72	1	0.72	0.12	0.736 3
x_1x_4	2.95	1	2.95	0.48	0.497 7
x_2x_3	16.87	1	16.87	2.77	0.118 1
x_2x_4	31.33	1	31.33	5.15	0.039 6
x_3x_4	65.41	1	65.41	10.75	0.005 5
剩余	85.21	14	6.09		
失拟	74.86	10	7.49	2.89	0.158 8
误差	10.35	4	2.59		
总和	2 406.33	28			

表 4 发芽率回归模型的方差分析

Tab.4 Variances analysis of regression model of germination rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	107.73	14	7.70	29.62	<0.000 1
x_1	57.41	1	57.41	220.97	<0.000 1
x_2	1.08	1	1.08	4.17	0.060 4
x_3	20.39	1	20.39	78.47	<0.000 1
x_4	15.52	1	15.52	59.73	<0.000 1
x_1^2	5.87	1	5.87	22.59	0.000 3
x_2^2	0.41	1	0.41	1.57	0.230 0
x_3^2	1.99	1	1.99	7.66	0.015 1
x_4^2	2.03	1	2.03	7.80	0.014 4
x_1x_2	0.13	1	0.13	0.51	0.485 7
x_1x_3	0.09	1	0.09	0.35	0.565 5
x_1x_4	1.43	1	1.43	5.50	0.034 3
x_2x_3	0.21	1	0.21	0.81	0.382 1
x_2x_4	0.33	1	0.33	1.27	0.278 3
x_3x_4	1.61	1	1.61	6.21	0.025 9
剩余	3.64	14	0.26		
失拟	3.14	10	0.31	2.50	0.195 2
误差	0.50	4	0.13		
总和	111.37	28			

响不显著。依据因子贡献率^[18]判定各参数重要程度,影响灭菌率参数顺序为:臭氧水初始质量浓度(2.645)、臭氧水处理时间(2.625)、臭氧水温度(2.233)、糙米含水率(0.868);影响发芽率参数顺序为:臭氧水温度(2.790)、糙米含水率(2.360)、臭

氧水处理时间(2. 276)。

2.3 各交互项对灭菌率和发芽率的影响分析

灭菌率模型中臭氧水初始质量浓度与臭氧水温度、臭氧水处理时间与臭氧水温度之间交互项达到

显著水平,同时发芽率模型中糙米含水率与臭氧水温度、臭氧水处理时间与臭氧水温度之间交互项达到显著水平。固定 2 个因素在其中心水平,研究另 2 个因素间交互影响,见图 1、2。

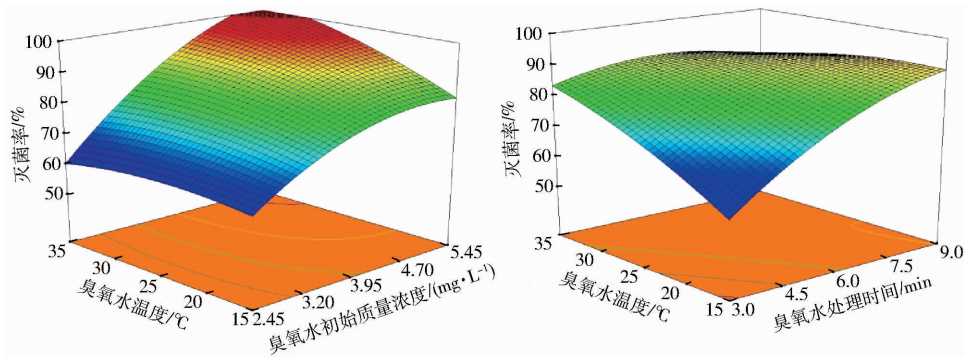


图 1 各交互项对灭菌率的响应曲面

Fig. 1 Response surface plots of disinfection rate as a function of interactions between various factors

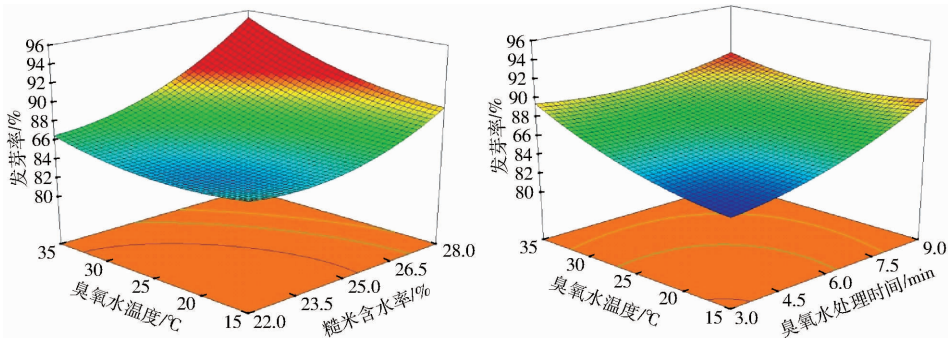


图 2 各交互项对发芽率的响应曲面

Fig. 2 Response surface plots of germination rate as a function of interactions between various factors

由图 1 可知,臭氧水初始质量浓度和臭氧水温度对灭菌率影响显著。温度为 15 ~ 25℃ 时,灭菌率在臭氧水初始质量浓度 2. 45 ~ 3. 95 mg/L 时提升较快,3. 95 ~ 5. 45 mg/L 时提升速率降低,臭氧水初始质量浓度对灭菌率的影响存在敏感区和非敏感区^[19]。温度为 25 ~ 35℃ 时,灭菌率随臭氧水初始质量浓度升高而近线性增加。臭氧分子的反应速率随臭氧水温度升高而加快,每升高 10℃ 提高 2 ~ 3 个反应级数^[20]。本研究中臭氧水初始质量浓度为 3. 95 mg/L 时,20℃ 升至 30℃ 过程中灭菌率从 83. 57% 升至 88. 38%。同时当臭氧水初始质量浓度和臭氧水温度分别接近 5. 45 mg/L 和 35℃ 时,灭菌率达到 100%,高温高初始浓度臭氧水具有极强的灭菌功效。

由图 1 可知,臭氧水处理时间和臭氧水温度对灭菌率影响极显著。低温(15 ~ 20℃)与短处理时间(3. 0 ~ 4. 5 min)组合无法高效灭菌,灭菌率只有 57% ~ 75%。低温继续延长处理时间(4. 5 ~ 7. 5 min)或短处理时间继续提高温度(20 ~ 30℃)可使灭菌率迅速提升,峰值分别为 85% 和 88% 左右。但高温(30 ~ 35℃)与长处理时间(7. 5 ~ 9. 0 min)组

合灭菌率却小幅度降低。这是因为臭氧水的分解近似服从一级反应规律,高温时分解极快^[21]。经臭氧水处理 7. 5 min 时臭氧分子及其分解副产物消耗殆尽,不具备杀菌能力。

糙米含水率和臭氧水温度对发芽率影响显著,见图 2。高含水率(26. 5% ~ 28. 0%)和高温(30 ~ 35℃)组合使发芽率大幅提升,峰值接近 96%。发芽过程是由休眠态向代谢活跃态的转变过程,在适宜糙米含水率和臭氧水温度下顺利进行。糙米含水率较低时无法充分激活内源 α-淀粉酶和蛋白酶,降低大分子有机物向小分子有机物酶解效率,无法提供发芽必须的物质与能量。臭氧水预处理后糙米发芽前最终含水率取决于初始含水率和浸泡时吸水量,而吸水量受吸水速率的影响。高温时水分子的扩散系数升高,吸水速率加快,确保了吸水量充足^[22-23]。

臭氧水处理时间和臭氧水温度对发芽率影响显著,见图 2。臭氧水温度 15 ~ 20℃ 或臭氧水处理时间 3. 0 ~ 4. 5 min 时,发芽率随另一参数的水平提升而缓慢升高。而臭氧水温度 30 ~ 35℃ 时,发芽率在臭氧水处理时间 6. 0 min 前后呈现小幅度先降低后

升高趋势。表明高温浸泡时会抑制内源酶活性,短时间处理(3.0~6.0 min)时发芽过程受到微弱抑制;而长时间处理(6.0~9.0 min)时灭菌率在峰值附近波动(图1),大量菌落杀灭后有利于糙米幼芽生长。

2.4 优化分析

在各因素的参数范围内,将每个变量的权重根据显著性排序分为5级,并使用 Design-Expert 8.0.6 数值优化方法,以灭菌率和发芽率均最高为优化目标对回归模型进行求解,在求解得到的各方案中选择灭菌率大于97%并兼顾发芽率大于90%的方案。最终择取优化工艺条件为:糙米含水率27.5%、臭氧水初始质量浓度4.7 mg/L、臭氧水处理时间6.5 min、臭氧水温度29.5℃。此工艺下灭菌率和发芽率的理论值为98.30%和92.26%。

以此工艺预处理待发芽糙米,试验结果如下:处理前菌落菌体浓度为(5.15±0.22)lg CFU/g,处理后菌落菌体浓度为(0.13±0.04)lg CFU/g,灭菌率为(97.49±0.11)%,发芽率为(91.89±0.26)%,与各自理论值接近。证实灭菌率和发芽率回归方程的预测效果较好。

2.5 对比试验与讨论

不同工艺对比试验结果见表5。臭氧水预处理与无灭菌处理相比,样品菌落菌体浓度降低约5.20 lg CFU/g,发芽率提高约0.49%,γ-氨基丁酸含量(质量比)增加约1.23 mg/(100 g);与次氯酸钠预处理相比,样品菌落菌体浓度降低约0.03 lg CFU/g,发芽率提高约3.95%,γ-氨基丁酸含量增加5.20 mg/(100 g)。臭氧水预处理能显著降低发芽糙米菌落总数,在一定程度上提高发芽率和γ-氨基丁酸含量。

表5 不同工艺对比验证试验结果

Tab.5 Results of contrast validation experiments of different treatments			
对照组	菌落菌体浓度/ (lg CFU·g ⁻¹)	发芽率/%	γ-氨基丁酸含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)
臭氧水预处理	0.24±0.08 ^b	91.89±0.26 ^a	29.48±0.21 ^c
次氯酸钠预处理	0.27±0.05 ^b	88.40±0.24 ^b	24.27±0.37 ^b
无灭菌处理	5.47±0.30 ^a	91.44±0.23 ^a	28.25±0.33 ^a

注:数据为样品“平均值±标准差”(n=3);同列数值后不同字母表示差异显著(P<0.05)。

臭氧水杀菌由目标菌落与臭氧分子直接反应和其分解后的羟基反应共同实现^[24]。臭氧分子和羟基作用于细胞膜,使其构成成分受损,这会导致细菌新陈代谢障碍并抑制其生长,使细菌溶解和死亡。臭氧水处理后菌落菌体浓度由(5.23±0.07)lg CFU/g降

到(0.10±0.06)lg CFU/g,灭菌率(8.09±0.20)%。次氯酸钠预处理后菌落菌体浓度由(5.36±0.12)lg CFU/g降到(0.22±0.04)lg CFU/g,灭菌率(95.90±0.07)%。臭氧水和次氯酸钠灭菌效果显著,兼顾灭菌率、发芽率和γ-氨基丁酸含量时,前者优势明显。

发芽过程中经灭菌处理过的菌落总数增加不显著。适宜的环境下菌落会快速增殖,但环境改变时部分菌落因不适应新环境而死亡^[25]。次氯酸钠和臭氧水处理后的残存菌落的生命活力在发芽阶段受明显抑制,因此增殖不明显。

不同处理工艺下发芽糙米样品γ-氨基丁酸含量间差异显著。γ-氨基丁酸是水溶性物质,浸泡时会部分溶出而降低其富集量,次氯酸钠长时间处理带来较多的溶出损失量。次氯酸钠处理样品发芽率较无灭菌处理和臭氧水预处理样品发芽率明显降低,后2种工艺下样品发芽率间差异不显著。次氯酸钠是碱性杀菌剂,而淀粉酶与蛋白酶最适激活环境为酸性,抑制酶的活性^[26],不利于糙米发芽和γ-氨基丁酸的富集。

臭氧水预处理利于γ-氨基丁酸富集的可能原因为谷氨酸脱羧酶(GAD)活性升高,谷氨酸转化成γ-氨基丁酸效率加快。GAD是控制γ-氨基丁酸合成关键胞质酶,主要集中在米胚细胞质内^[27]。GAD的催化过程需氢离子(H⁺)存在,其活性在胞质pH值为5.5左右达到峰值^[28]。臭氧水分解过程是自由基的连锁反应,包含起始、加速与抑制3个阶段^[24]。起始阶段臭氧分子与氢氧根离子(OH⁻)反应生成超氧化氢自由基(HO₂·)和超氧自由基(·O₂⁻),加速阶段臭氧分子与羟基自由基(·OH)反应生成HO₂·和氧气分子(O₂)。这2个阶段均存在HO₂·分解生成H⁺和·O₂⁻的反应,臭氧水中H⁺浓度逐渐升高。当H⁺随水分子渗透进米胚细胞时,胞质内pH值逐渐由中性向偏酸性转化。

3 结论

(1)建立了基于分段加湿方法的臭氧水预处理工艺参数与糙米灭菌率和发芽率间影响规律的数学模型,经检验模型拟合良好,可以预测臭氧水预处理后糙米灭菌率和发芽率。

(2)臭氧水预处理待发芽糙米工艺优化参数组合为:糙米含水率27.5%、臭氧水初始质量浓度4.7 mg/L、臭氧水处理时间6.5 min、臭氧水温度29.5℃,此工艺条件下灭菌率为(97.49±0.11)%,发芽率为(91.89±0.26)%。

参 考 文 献

- 1 刘贞. 糙米发芽制备高 γ -氨基丁酸营养粉的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.
LIU Zhen. Study on the preparation of nutritional power with high γ -aminobutyric acid from germinated brown rice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 2 丁俊胄,杨特武,周强,等. 厌氧胁迫对发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量变化的影响[J]. 中国粮油学报,2015,30(2):6-10.
DING Junzhou, YANG Tewu, ZHOU Qiang, et al. γ -aminobutyric acid concent of brown rice induced by hypoxia stress during germination [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(2): 6-10. (in Chinese)
- 3 钱行,杨润强,尹永琪,等. 未熟粒糙米低氧胁迫发芽期间生理生化变化研究[J]. 食品科学,2014,35(5):89-93.
QIAN Hang, YANG Runqiang, YIN Yongqi, et al. Physiological and biochemical changes during germination of immature brown rice under hypoxia stress [J]. Food Science, 2014, 35(5): 89-93. (in Chinese)
- 4 CHEN H H, CHANG H H, CHEN Y K, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: low-pressure plasma [J]. Food Chemistry, 2015, 191: 120-127.
- 5 WICHAMANE Y, TEERARAT I. Production of germinated red Jasmine brown rice and its physicochemical properties [J]. International Food Research Journal, 2012, 19(4): 1649-1654.
- 6 CAO Y P, JIA F G, HAN Y L, et al. Study on the optimal moisture adding rate of brown rice during germination by using segmented moisture conditioning method [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(10): 6599-6606.
- 7 施建兵,谢晶,高志立,等. 臭氧水浸渍后冰温贮藏提高鲳鱼块的保鲜品质[J]. 农业工程学报,2013,29(6):274-279.
SHI Jianbing, XIE Jing, GAO Zhili, et al. Effects of ozone water dipping and super-chilling on improving preservation quality of pomfret fillet [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 274-279. (in Chinese)
- 8 王海鸥,胡志超,吴峰,等. 超声波臭氧组合果蔬清洗机设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(7):165-169,175.
WANG Haiou, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and experiment on ultrasonic-ozone washer for fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 165-169,175. (in Chinese)
- 9 MENDEZ F, MAIER D E, MASON L J, et al. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance[J]. Journal of Stored Products Research, 2003, 39(1): 33-44.
- 10 CHEN Ran, MA Fei, LI Peiwu, et al. Effect of ozone on aflatoxins detoxification and nutritional quality of peanuts [J]. Food Chemistry, 2014, 146:284-288.
- 11 马涛,陈伟玲. 糙米发芽浸泡过程中臭氧对微生物灭菌效果的影响[J]. 食品工业科技,2013,34(2):245-248.
MA Tao, CHEN Weiling. Microbial sterilization effect of ozone to brown rice germination during the soaking process [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(2): 245-248. (in Chinese)
- 12 程威威,吴跃,周婷,等. 不同前处理对糙米发芽的影响[J]. 食品工业科技,2014,35(12):99-103.
CHENG Weiwei, WU Yue, ZHOU Ting, et al. Effect of different pretreatment on the germination of brown rice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(12): 99-103. (in Chinese)
- 13 GB/T 5750.11—2006 生活饮用水标准检验方法消毒剂指标[S]. 2006.
- 14 ZHANG Q, JIA F G, ZUO Y J, et al. Optimization of cellulase conditioning parameters of germinated brown rice on quality characteristics [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(1): 465-471.
- 15 GB 4789.2—2010 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 2010.
- 16 王京厦. 发芽糙米工艺研究[D]. 雅安:四川农业大学,2006.
WANG Jingxia. Study on craft of germinated brown rice [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 17 程威威,周婷,吴跃,等. 高效液相色谱法测定发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量[J]. 食品科学,2014,35(12):98-101.
CHENG Weiwei, ZHOU Ting, WU Yue, et al. HPLC analysis of γ -aminobutyric acid in germinated brown rice [J]. Food Science, 2014, 35(12): 98-101. (in Chinese)
- 18 贾富国,王吉泰,兰海鹏,等. 循环加湿工艺对发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(20):288-292.
JIA Fuguo, WANG Jitai, LAN Haipeng, et al. Effect of cyclic moisture conditioning treatment on γ -aminobutyric acid content of germinated brown rice [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 288-292. (in Chinese)
- 19 OLMEZ H, AKBAS M Y. Optimization of ozone treatment of fresh-cut green leaf lettuce [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): 487-494.
- 20 GUZEL-SEYDİM Z B, GRZZNE A K, SEYDİM A C. Use of ozone in the food industry [J]. LWT—Food Science and Technology, 2004, 37(4): 453-460.
- 21 乔彩云,李建科,李梦颖,等. 臭氧在水中的溶解和消除特性及其对苹果青霉的杀菌效果 [J]. 食品科学,2012,33(19):79-82.
QIAO Caiyun, LI Jianke, LI Mengying, et al. Dissolution and elimination characteristics of ozone in water and its bactericidal effect on *Penicillium expansum* [J]. Food Science, 2012, 33(19): 79-82. (in Chinese)
- 22 温坤芳,林亲录,吴越,等. 浸泡工艺对糙米发芽率的影响[J]. 粮食与饲料工业,2012(2):5-9.
WEN Kunfang, LIN Qinlu, WU Yue, et al. Effect of soaking process on the germination rate of brown rice [J]. Cereal and Feed

- Industry, 2012(2): 5–9. (in Chinese)
- 23 PEREZ J H, TANAK F, UCHINO T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2615–2623.
- 24 KHADRE M A, YOUSEF A E, KIM J G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(9): 1242–1152.
- 25 梁建芬, 张欣哲, 易静, 等. 糙米发芽过程中微生物变化的研究[J]. 食品科技, 2006, 31(12): 130–132.
LIANG Jianfen, ZHANG Xinzhe, YI Jing, et al. Changes of micro-organisms in brown rice soaking and germination [J]. Food Science and Technology, 2006, 31(12): 130–132. (in Chinese)
- 26 鲁战会, 张燕, 李里特. 发芽糙米的杀菌工艺研究[J]. 食品科学, 2006, 27(8): 166–170.
LU Zhanhui, ZHANG Yan, LI Lite. Study on sterilization processes on germinated brown rice [J]. Food Science, 2006, 27(8): 166–170. (in Chinese)
- 27 张晖. 米胚谷氨酸脱羧酶性质及其富集 γ -氨基丁酸研究[D]. 无锡: 江南大学, 2004.
ZHANG Hui. Study on the properties of glutamate decarboxylase and accumulation of γ -aminobutyric acid in rice germ [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2004. (in Chinese)
- 28 刘玲珑. 稻米浸水后 γ -氨基丁酸(GABA)的积累及其分子机制研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
LIU Linglong. The accumulation of Gamma-aminobutyric acid in rice grain during water soaking and its molecular mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005. (in Chinese)
-

欢迎订阅《农业工程》

《农业工程》是由中国农业机械化科学研究院主管、北京卓众出版有限公司主办的农业工程类综合性学术期刊, 2011 年创刊, 双月刊, 国内统一连续出版物号 CN 11–6025/S, 国际标准连续出版物号 ISSN 2095–1795。办刊宗旨是解读农业工程政策, 聚焦农业工程各领域关键技术的创新突破、成套技术系统集成和先进实用技术的推广示范, 搭建农业工程交叉学科产学研集成信息平台, 推进农业工程技术创新与成果转化, 更好地为“三农”服务。

该刊设有“装备与机械化”“信息与电气化”“生物环境与能源”“农副产品加工与贮藏”“食品科学与工程”“水土工程”“土地资源管理”“设计制造及理论研究”“教学研究”“农学与生物技术”“农业经济管理”等栏目, 2014 年 12 月入选国家新闻出版广电总局认定的首批学术期刊, 2016 年 10 月入选中国科技核心期刊。

《农业工程》每期定价 20 元, 全年 120 元, 欢迎订阅, 欢迎投稿。

地址: 北京市朝阳区德外北沙滩 1 号 16 信箱 邮编: 100083

电话: 010–64882380/3625 网址: www.d1ae.com

邮箱: nygc_2011@163.com d1ae2011@126.com