

浸泡与发芽对蒸谷米镉含量的影响

刘淼淼^{1,2}, 孙倩倩¹, 张波¹, 周国燕², 郭波莉^{1*}

¹ 中国农业科学院农产品加工研究所 北京 100193

² 上海理工大学健康科学与工程学院 上海 200093

摘要 目的:探讨稻谷发芽与糙米发芽两种发芽方式对蒸谷米镉含量的影响,并对工艺条件进行优化,为降低蒸谷米的镉含量提供技术参考。方法:以湘早籼 24 号稻谷为试验材料,设置浸泡不发芽、浸泡发芽、浸泡发芽+二次浸泡 3 种处理方式,分析比较浸泡、发芽与二次浸泡对稻谷发芽和糙米发芽的蒸谷米镉含量的影响,并对柠檬酸浓度、浸泡时间、浸泡温度进行单因素及正交试验优化,选出最佳蒸谷米降镉工艺条件。结果:糙米发芽的蒸谷米镉含量降低效果优于稻谷发芽,糙米发芽的二次浸泡工艺优化后,得到最佳工艺组合为柠檬酸浓度 0.15 mol/L,浸泡时间 24 h,浸泡温度 35 ℃。结论:发芽可以降低镉与蛋白的结合能力,二次浸泡后镉含量显著下降,与稻谷发芽处理相比,糙米发芽工艺的蒸谷米镉含量更低,经过二次浸泡条件优化,在最佳工艺组合条件下镉降低率为 56.34%。

关键词 稻谷;糙米;蒸谷米;浸泡;镉

文章编号 1009-7848(2024)07-0261-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.07.026

稻谷中蛋白质对重金属镉有很强的富集能力^[1-2],会增加稻谷及其制品重金属镉超标的风险。已报道的脱镉技术主要有物理砻谷碾米、溶剂浸提、微生物发酵等方法。魏帅等^[3]研究表明稻谷砻谷后得到糙米的降镉率为 11.5%,糙米碾米后得到精米的降镉率为 30%。Sharafi 等^[4]用去离子水浸提精米 12 h 后,降镉率达 18%。博亚平等^[5]研究显示乳酸浸提米粉中重金属镉的效果好于乙酸、酒石酸、草酸和苹果酸,脱除率在 85%以上。Zhang 等^[6]研究表明混合菌种发酵对镉的去除率(69.32%)高于单一菌种发酵的去除率(30.43%)。以上技术是通过物理脱除、螯合重金属以及分解大米蛋白的方法来降低镉含量。

发芽可激活释放一些酶,使籽粒结构变得疏松^[7-8],且蛋白酶会改变蛋白质结构,使镉与蛋白的结合能力降低。发芽过程包括浸泡和萌芽 2 个步骤^[9]。王啊娟等^[10]研究表明糙米发芽后降镉率在 6.2%~35.5%之间,而浸泡和萌芽对降镉的贡献率并不清楚。此外,除糙米发芽外,稻谷也可以直接发芽制作发芽糙米,两者的降镉效率是否存在差

异有待研究。本研究通过浸泡不发芽、浸泡发芽、浸泡发芽+二次浸泡共 3 种处理方式,分析发芽过程中各物料的镉含量,比较稻谷发芽和糙米发芽对蒸谷米镉含量的影响,选出降镉效果最佳的工艺条件,为降低蒸谷米的镉含量提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

稻谷(湘早籼 24 号),湖南省湘潭市。大米标样(1 000 μg/mL),国家粮食局科学研究院。

柠檬酸(食品级),北京萃锋科技有限公司;次氯酸钠、硝酸、过氧化氢均为分析纯级,北京化学试剂研究所。

1.2 仪器与设备

CSATAKE-THU 35G 型砻谷机,日本佐竹公司;MM400 混合研磨仪,德国莱驰公司;BLC-250-III 恒温恒湿箱,北京陆希科技有限公司;DHG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏公司;Agilent 7785 ICP-MS 质谱仪,安捷伦科技有限公司;CEMMars 240/50 型密闭微波消解仪,美国培安科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发芽

1.3.1.1 稻谷发芽 原料为稻谷,稻谷发芽后经过加工得到蒸谷米,发芽步骤和具体操作如表 1

收稿日期:2023-07-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目
(2020YFC1606800)

第一作者:刘淼淼,女,硕士生

通信作者:郭波莉 E-mail: guoboli2007@126.com

所示。处理组包括浸泡不发芽组、浸泡发芽组、浸泡发芽+二次浸泡组,浸泡不发芽组是稻谷经过灭活失去萌芽能力后去发芽,因此这组处理只有浸泡作用而无发芽作用,与浸泡发芽组对比可以明

确镉降低是浸泡起作用还是发芽起作用,浸泡发芽+二次浸泡组是在稻谷发芽后用 0.1 mol/L 柠檬酸溶液二次浸泡,为进一步吸附发芽后的游离镉。每个处理组重复 3 次试验。

表 1 不同处理组稻谷发芽操作步骤

Table 1 Operation steps of rice germination in different treatment groups

处理步骤	方法	浸泡 不发芽组	浸泡 发芽组	浸泡不发芽+ 二次浸泡组	浸泡发芽+ 二次浸泡组
清洗消毒	0.1 mol/L NaClO 清洗消毒 10 min, 蒸馏水冲洗 5 次	√	√	√	√
灭活	80 °C 热水灭活 15 min	√	—	√	—
浸泡发芽	25 °C 浸泡 12 h 后, 置于湿度 90%, 温度 30 °C 恒温恒湿箱, 发芽 13 h	√	√	√	√
二次浸泡	0.1 mol/L 柠檬酸于 25 °C 下二次浸泡 2 h	—	—	√	√
蒸煮	蒸汽加热 10 min	√	√	√	√
干燥	50 °C 烘箱中干燥 4 h	√	√	√	√
砻谷	砻谷机脱去稻壳, 得到发芽蒸谷米	√	√	√	√

注:√. 表示有此步骤;—. 此步骤未处理。

1.3.1.2 糙米发芽 原料为砻谷后的糙米, 发芽步骤和具体操作如表 2 所示。处理组包括浸泡不发芽组、浸泡发芽组、浸泡发芽+二次浸泡组, 浸泡不发芽组是糙米经过灭活失去萌芽能力后去发芽, 因此这组处理只有浸泡作用而无发芽作用, 与

浸泡发芽组对比可以知镉降低是浸泡起作用还是发芽起作用, 浸泡发芽+二次浸泡是糙米发芽后用 0.1 mol/L 柠檬酸溶液二次浸泡, 为进一步吸附发芽后的游离镉。每个处理组重复 3 次试验。

表 2 不同处理组糙米发芽操作步骤

Table 2 Operation steps of brown rice germination in different treatment groups

处理步骤	方法	浸泡 不发芽组	浸泡 发芽组	浸泡不发芽+ 二次浸泡组	浸泡发芽+ 二次浸泡组
砻谷	砻谷机脱去稻壳, 得到糙米	√	√	√	√
清洗消毒	0.1 mol/L NaClO 清洗消毒 10 min, 蒸馏水冲洗 5 次	√	√	√	√
灭活	80 °C 热水灭活 15 min	√	—	√	—
浸泡发芽	25 °C 浸泡 12 h 后, 置于湿度 90%, 温度 30 °C 恒温恒湿箱, 发芽 13 h	√	√	√	√
二次浸泡	0.1 mol/L 柠檬酸于 25 °C 下二次浸泡 2 h	—	—	√	√
蒸煮	蒸汽加热 10 min	√	√	√	√
干燥	50 °C 烘箱中干燥 4 h	√	√	√	√

注:√. 表示有此步骤;—. 此步骤未处理。

1.3.2 单因素实验 在 1.3.1 节的发芽工艺条件下, 分别改变柠檬酸浓度(0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 mol/L), 浸泡时间(6, 12, 18, 24, 30 h), 浸泡温度(20, 25, 30, 35, 40 °C), 考察各单因素对柠檬酸

二次浸泡时蒸谷米镉含量的影响。

1.3.3 正交试验 采用正交试验优化镉降低工艺, 选择柠檬酸浓度、浸泡时间、浸泡温度为影响因素, 以镉降低率为考察指标, 设计 3 因素 3 水平

正交试验,每个条件做3次重复,结果取平均值。试验因素水平设计如表3所示。

1.3.4 镉含量检测方法 样品消解:利用微波消解法,样品称样量 0.1500 g,消解体系为 8 mL HNO_3 +2 mL H_2O_2 。采用逐步升温的方式消解,初始温度为 40 $^{\circ}\text{C}$,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 120 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min;再以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 160 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min;最后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 180 $^{\circ}\text{C}$,保持 15 min。消解完成后,将消解液置于电热板上(180 $^{\circ}\text{C}$)加热蒸发至剩余体积 0.5 mL,用超纯水定容至 100 mL,待测,每组试验重复测定 3 次。

含量测定:利用 ICP-MS 测定样品镉的含量。仪器参数为:射频功率 1 280 W,雾化室温度 2 $^{\circ}\text{C}$,辅助气体流量 0.98 L/min,补偿气体流量 1.0 L/min,载气流量 1.0 L/min。

2 结果与分析

2.1 稻谷和糙米发芽对蒸谷米镉含量的影响

由表4可知,4个处理组中稻谷发芽工艺的蒸谷米镉含量没有显著差异,糙米发芽工艺的蒸谷米镉含量降低效果更好,原因可能是稻谷或糙米在发芽时会进行呼吸作用^[11-13],需要氧气供应,由于稻谷有稻壳的存在,对呼吸作用有一定的阻碍,发芽活力低于糙米。因此,糙米发芽的生理生

表3 正交试验设计表

水平	浸泡液浓度/ (mol/L)	浸泡时间/h	浸泡温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.05	12	25
2	0.10	18	30
3	0.15	24	35

化活性较高,酶类活性也随之升高,蛋白质结构变的更为松散,游离出的重金属镉较多^[14-15],因此糙米发芽后进行柠檬酸二次浸泡,柠檬酸与游离镉发生络合反应,镉含量显著降低。

糙米发芽工艺中,浸泡不发芽组、浸泡发芽组镉含量相对原料有显著降低,镉降低率分别为 6.6% 和 9.5%,而浸泡不发芽组与浸泡发芽组之间镉含量没有显著差异,这是由于发芽仅使镉与蛋白的结合能力降低,而镉还依然保存在糙米中。浸泡发芽组与浸泡发芽+二次浸泡组之间镉含量有显著差异,浸泡不发芽组和浸泡不发芽+二次浸泡组之间镉含量没有显著差异,说明发芽后二次浸泡可以显著降低镉含量。综上所述,发芽可使蛋白质结构变的较为松散,镉与蛋白之间的结合能力降低;利用柠檬酸进行二次浸泡,可以有效络合游离镉^[16],致使糙米中镉含量大幅降低(21.5%)。因此进一步对糙米发芽的二次浸泡工艺进行优化。

表4 稻谷发芽与糙米发芽的蒸谷米镉含量及降低率

Table 4 Germination of rice and germination of brown rice cadmium content and reduction rate of germinated parboiled rice

组别	稻谷发芽工艺/(mg/kg)	降低率/%	糙米发芽工艺/(mg/kg)	降低率/%
原料	0.622 ± 0.024 ^a		0.622 ± 0.024 ^a	
浸泡不发芽组	0.576 ± 0.037 ^b	7.4	0.581 ± 0.026 ^b	6.6
浸泡发芽组	0.595 ± 0.024 ^b	4.3	0.563 ± 0.018 ^b	9.5
浸泡不发芽+二次浸泡组	0.588 ± 0.026 ^b	5.5	0.559 ± 0.032 ^b	10.1
浸泡发芽+二次浸泡组	0.571 ± 0.026 ^b	8.2	0.488 ± 0.016 ^c	21.5

注:用 Duncan 法进行多重比较,不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 柠檬酸浓度对蒸谷米镉降低率的影响

在浸泡温度 30 $^{\circ}\text{C}$,浸泡时间 18 h 条件下,分别考察 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 mol/L 柠檬酸溶液浓度对蒸谷米中镉降低率的影响。随着柠檬酸浓度的增大,蒸谷米的镉降低率呈先快速升高后平缓的趋势,当柠檬酸浓度增加到 0.1 mol/L 时,

镉降低率达 49.6%,随着柠檬酸浓度继续增加,镉降低率无显著差异(图1)。研究证明柠檬酸含有的羧基、羟基等官能团可以与重金属络合^[17-19],柠檬酸浓度增大,pH 值降低,酸度增大,重金属镉与有机酸之间的络合效应在酸性条件下增强,柠檬酸浓度从 0.10 mol/L 增加到 0.20 mol/L,蒸谷米中可

交换的游离态镉已经去除,因此镉降低率无显著变化。考虑到经济效益和能耗,选择 0.10 mol/L 柠檬酸进行后续试验。

2.3 浸泡时间对蒸谷米重金属去除的影响

以 0.1 mol/L 柠檬酸为浸泡液,浸泡温度 30 °C 条件下,分别分析 6,12,18,24,30 h 浸泡时间对蒸谷米中镉降低率的影响。随浸泡时间延长,蒸谷米的镉降低率显著升高,当浸泡时间为 18 h 时,镉降低率为 50.1%(图 2)。Ren 等^[20]和李克强等^[21]研究表明,浸泡时间与蛋白质含量成反比^[20-21],一部分容易被酸水解的蛋白溶解后,镉离子与蛋白的结合被打断,镉降低率显著升高,此时游离镉的溶出量基本达到饱和,继续将浸泡时间延长到 30 h,镉降低率增加缓慢,浸泡时间 30 h 时,镉降低率为 55.7%,虽然镉降低率有显著提高,考虑到时间过长不利于蒸谷米的使用品质,因此选择浸泡时间 18 h 进行后续试验。

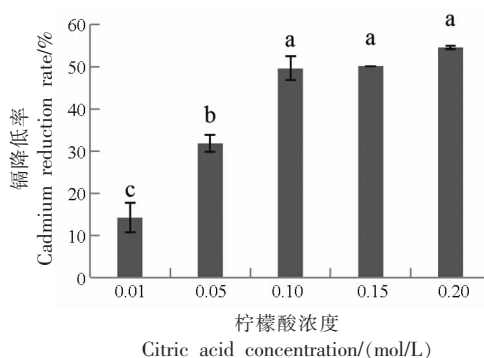
2.4 浸泡温度对蒸谷米重金属去除的影响

以 0.1 mol/L 柠檬酸为浸泡液,浸泡时间 18 h 条件下,分别分析 20,25,30,35,40 °C 浸泡温度对蒸谷米中镉降低率的影响。随着浸泡温度的升高,镉降低率呈逐步升高的趋势,在浸泡温度为 30 °C 时,镉降低率最高(51.6%)(图 3)。浸泡液温度越高,金属离子的扩散系数越高,扩散速度也越快,促进了酸性条件下镉的迁移溶出^[22-24]。浸泡温度升高到 40 °C 时的镉降低率(53.9%)与浸泡温度 30 °C 的镉降低率(51.6%)相比无显著升高,考虑到温度高时能耗高,因此选择浸泡温度 30 °C 进行后续试验。

2.5 正交试验优化

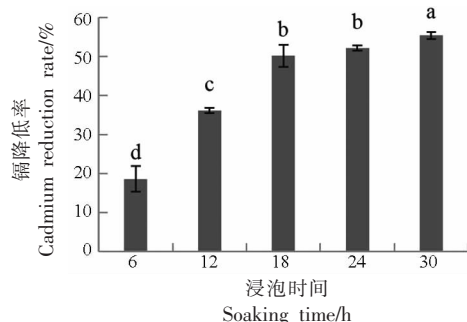
根据单因素实验结果,设计 3 因素 3 水平的正交试验对蒸谷米重金属去除工艺进行优化,结果见表 5,由极差分析结果可知,各因素对镉降低率的影响程度为 $B>A>C$,即浸泡时间>柠檬酸浓度>浸泡温度,最佳工艺组合为 $A_3B_3C_3$,即柠檬酸浓度 0.15 mol/L,浸泡时间 24 h,浸泡温度 35 °C,在最佳工艺组合条件下,镉降低率为 56.34%。表 6 方差分析结果表明,柠檬酸浓度、浸泡时间、浸泡温度对镉降低率均有显著影响($P<0.01$)。

采用另一品种的 B11 稻谷在最佳工艺组合 $A_3B_3C_3$ 下试验验证,原料镉含量 0.386 mg/kg,正交



注:用 Duncan 法进行多重比较,不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

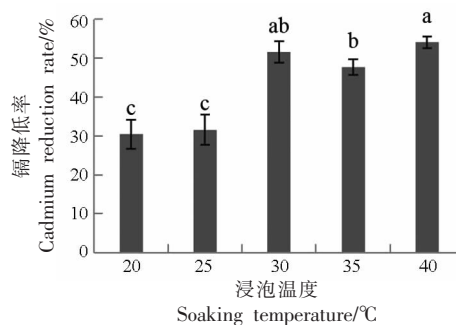
图 1 柠檬酸浓度对蒸谷米重金属镉去除的影响
Fig.1 Effect of citric acid concentration on cadmium removal of germinated parboiled rice



注:用 Duncan 法进行多重比较,不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图 2 浸泡时间对蒸谷米重金属镉去除的影响

Fig.2 Effect of soaking time on cadmium removal of germinated parboiled rice



注:用 Duncan 法进行多重比较,不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图 3 浸泡温度对蒸谷米重金属镉去除的影响

Fig.3 Effect of soaking temperature on cadmium removal of germinated parboiled rice

试验优化工艺得到降镉率 59.65%,处理后 0.155 mg/kg,符合我国食品中 Cd 污染限量标准的要求(0.2 mg/kg)。

表5 正交试验结果

Table 5 Results of orthogonal test

试验号	A(柠檬酸浓度)/(mol/L)	B(浸泡时间)/h	C(浸泡温度)/°C	镉降低率/%
1	0.05	12	25	28.65
2	0.05	18	30	37.93
3	0.05	24	35	52.64
4	0.1	12	30	36.18
5	0.1	18	35	46.71
6	0.1	24	25	47.17
7	0.15	12	35	49.14
8	0.15	18	25	43.77
9	0.15	24	30	56.34
K_1	119.22	113.97	119.59	
K_2	130.05	128.41	133.44	
K_3	152.25	159.14	148.49	
k_1	39.74	37.99	39.86	
k_2	43.35	42.80	44.48	
k_3	50.75	53.05	49.49	
R	11.01	15.06	9.63	
主次水平		$B>A>C$		
最优组合	A_3	B_3	C_3	

表6 正交试验方差分析表

Table 6 Orthogonal test ANOVA table

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
修正模型	1 807.401	6	301.234	75.935	<0.01
截距	52 943.253	1	52 943.253	13 345.934	<0.01
A(柠檬酸浓度)	462.584	2	231.292	58.304	<0.01
B(浸泡时间)	918.414	2	459.207	115.757	<0.01
C(浸泡温度)	426.402	2	213.201	53.744	<0.01
误差	79.340	20	3.967		
总计	54 829.994	27			
修正后总计	1 886.741	26			

注: $P<0.05$ 表示因素对试验结果有显著影响, $P<0.01$ 表示有极显著影响。

3 结论

发芽使籽粒和蛋白质结构变得疏松, 并使镉与蛋白的结合能力降低。在发芽基础上, 柠檬酸作为重金属螯合剂二次浸泡高效络合了从蛋白质中分离出的游离镉, 从而达到降低镉含量的目的。柠檬酸二次浸泡降低镉含量的最佳工艺参数为柠檬酸浓度 0.15 mol/L, 浸泡时间 24 h, 浸泡温度 35 °C, 在最佳工艺条件下, 镉降低率为 56.34%。镉含量在 0.2~0.454 mg/kg 之间的稻谷经过此处理后均符合国家限量标准 0.2 mg/kg, 因此本试验方法可以解决大部分镉含量超标大米的污染问题^[25-26],

减轻政府储粮成本。

参 考 文 献

- [1] 田阳, 魏帅, 魏益民, 等. 稻谷加工产物的镉含量及累积量分析[J]. 中国食品学报, 2014, 14(5): 186-191.
TIAN Y, WEI S, WEI Y M, et al. Analysis of cadmium content and accumulation in processed rice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(5): 186-191.
- [2] 辜世伟, 胡云均, 刘方菁, 等. 不同加工精度对稻谷

- 中镉含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(8): 8-12.
- GU S W, HU Y Y, LIU F J, et al. Effect of different processing precision on cadmium content in paddy rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(8): 8-12.
- [3] 魏帅, 田阳, 郭波莉, 等. 稻谷加工工艺对产品镉含量的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 146-150.
- WEI S, TIAN Y, GUO B L, et al. Effect of hulling and milling process on cadmium concentration in rice product[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(3): 146-150.
- [4] SHARAFI K, YUNESIAN M, NODEHI R N, et al. The reduction of toxic metals of various rice types by different preparation and cooking processes - Human health risk assessment in Tehran households, Iran[J]. Food Chemistry, 2019, 280(15): 294-302.
- [5] 傅亚平, 廖卢艳, 王巨涛, 等. 酸溶技术脱除大米粉中重金属镉的工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 103-109.
- FU Y P, LIAO L Y, WANG J T, et al. Process optimization of cadmium removal in rice powder with acid soluble technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(3): 103-109.
- [6] ZHANG L, LEI Q, CHENG Y, et al. Study on the removal of cadmium in rice using microbial fermentation method[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(6): 1467-1474.
- [7] 李向红, 刘永乐, 俞健, 等. 精白保胚米发芽过程中米谷蛋白及其氨基酸的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 37-40.
- LI X H, LIU Y L, YU J, et al. Changes in protein and amino acids in polished rice with intact germ during germination[J]. Food Science, 2015, 36(1): 37-40.
- [8] MUNARKO H, SITANGGANG A B, KUSNANDAR F, et al. Germination of six Indonesian brown rice: Evaluation of antioxidant, bioactive compounds, fatty acids and pasting properties[J]. Food Science and Technology, 2022, 42(128): 19721.
- [9] 刘晓飞, 马京求, 侯艳, 等. 发芽糙米多糖的结构解析及降糖活性分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 265-274.
- LIU X F, MA J Q, HOU Y, et al. Structure analysis and hypoglycemic activity of germinated brown rice polysaccharides[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(8): 265-274.
- [10] 王啊娟, 付湘晋, 赵喜玲, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法研究发芽对糙米重金属元素(镉、铅、砷)含量影响[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(3): 21-23.
- WANG A J, FU X J, ZHAO X L, et al. Using ICP-MS to study the effect of germination on the content of heavy metal (Cd,Pb,As) in brown rice[J]. Cereals & Oils, 2013, 26(3): 21-23.
- [11] 王斌. 稻谷发芽富集 γ -氨基丁酸及大米加工技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- WANG B. Study on enrichment of γ -aminobutyric acid in germinating paddy and rice processing technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [12] 施裕松. 发芽糙米富集 γ -氨基丁酸技术与代餐粉开发[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- SHI Y S. Accumulation of γ -aminobutyric acid in germinated rice and meal replacement powder development[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [13] 罗曦, 曾亚文, 杨树明, 等. 不同发芽时间下发芽稻谷和糙米不同部位 γ -氨基丁酸含量差异[J]. 食品科学, 2009, 30(13): 124-128.
- LUO X, ZENG Y W, YANG S M, et al. Changes in Gamma-aminobutyric acid content in different parts of rice and brown rice during germination[J]. Food Science, 2009, 30(13): 124-128.
- [14] 李冰冰, 王玉萍, 顾振新, 等. 发芽糙米与稻谷的谷氨酸脱羧酶活力及 γ -氨基丁酸含量比较[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(5): 28-30.
- LI B B, WANG Y P, GU Z X, et al. Change of glutamate decarboxylase activities and γ -aminobutyric acid contents of brown rice and paddy-rice during their germination[J]. Food and Fermentation Industries, 2006, 32(5): 28-30.
- [15] 顾振新, 陈志刚, 汪志君, 等. 糙米与稻谷的发芽活力及发芽期间主要物质含量比较[J]. 中国粮油学报, 2004, 19(2): 8-10.
- GU Z X, CHEN Z G, WANG Z J, et al. Germination

- nating power and composition change during germination—a comparison between brown rice and unhusked rice[J]. Chinese Cereals and Oils Association, 2004, 19(2): 8–10.
- [16] 丁俊青, 刘贞, 赵思明, 等. 糙米发芽过程中内源酶活力及主要成分的变化[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 29–32.
- DING J Z, LIU Z, ZHAO S M, et al. Changes of endogenous enzyme activities and major components in brown rice during germination[J]. Food Science, 2011, 32(11): 29–32.
- [17] XU W H, LI Y R, HE J P, et al. Cd uptake in rice cultivars treated with organic acids and EDTA[J]. Journal of Environmental Science, 2010, 22(3): 441–447.
- [18] LI Y J, HU P J, ZHAO J, et al. Remediation of cadmium- and lead-contaminated agricultural soil by composite washing with chlorides and citric acid[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(7): 5563–5571.
- [19] 杨帅, 李远, 涂晨, 等. 柠檬酸对污染棕壤中镉的去除优化及结合形态影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(7): 2868–2876.
- YANG S, LI Y, TU C, et al. Optimization of cadmium removal from and speciation in contaminated brown soil using citric acid[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(7): 2868–2876.
- [20] REN X H, YAN R, WANG H C, et al. Citric acid and ethylene diamine tetra-acetic acid as effective washing agents to treat sewage sludge for agricultural reuse[J]. Waste Management, 2015, 46(11): 440–448.
- [21] 李克强, 王韧, 冯伟, 等. 整米中重金属镉的酸法消减工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(8): 10–17.
- LI K Q, WANG R, FENG W, et al. Optimization of heavy metal cadmium removal from the whole rice by acid process[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(8): 10–17.
- [22] ZOU Y C, ZHANG C, JU X R, et al. Effect of removing cadmium with citric acid on the physicochemical and microstructure properties of rice bran[J]. Food Control, 2019, 98(32): 290–296.
- [23] CHILIAN A, BANCUTA O R, BANCUTA I, et al. Extraction of heavy metals and phosphorus from sewage sludge with elimination of antibiotics and biological risks[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 437(1): 135298.
- [24] HU Z Q, TANG X Z, LIU J F, et al. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice[J]. Food Chemistry, 2017, 214(1): 285–292.
- [25] 张荣. 中国主要产粮区稻米镉污染调查及镉污染稻米的加工利用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.
- ZHANG R. Cadmium investigation of rice in Chinese major agricultural regions and utilization of rice polluted by cadmium[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2017.
- [26] 张建辉, 王芳斌, 汪霞丽, 等. 湖南稻米镉和土壤镉锌的关系分析[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 156–160.
- ZHANG J H, WANG F B, WANG X L, et al. Relationship between Cd and Zn in soil and Cd in Rice Grain[J]. Food Science, 2015, 36(22): 156–160.

Effect of Soaking and Germination on Cadmium Content in Parboiled Rice

Liu Miaomiao^{1,2}, Sun Qianqian¹, Zhang Bo¹, Zhou Guoyan², Guo Boli^{*}

¹Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193

²School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract Objective: The purpose of this study was to explore the effects of rice and brown rice germination on the cadmium content of parboiled rice, and optimize the technological conditions, so as to provide technical reference for reducing the cadmium content of parboiled rice. Methods: Xiangzaoxian 24 rice was used as the experimental material, three treatments of soaking without germination, soaking germination, soaking germination + secondary soaking were set up. The effects of soaking, germination and secondary soaking on the cadmium content of parboiled rice and brown rice

were analyzed and compared. The single factor optimization and orthogonal experiments of citric acid concentration, soaking time and soaking temperature were carried out for the germination process of brown rice with good effect of reducing cadmium content. Results: The effect of reducing cadmium content of brown rice sprouting steamed rice was better than that of rice germinating. After optimizing the secondary soaking process of brown rice germination, the optimum process was obtained as follows: citric acid concentration 0.15 mol/L, soaking time 24 hours, soaking temperature 35 °C. Conclusions: Germination could reduce the binding ability of cadmium and protein, and the cadmium content decreased significantly after secondary soaking. Compared with rice germination treatment, the cadmium content of brown rice parboiled rice was lower. The optimum combination of cadmium content of brown rice was 56.34%.

Keywords rice; brown rice; parboiled rice; soak; cadmium