

水分添加量对豇豆发酵过程中品质变化的影响

Study on different Water addition changes in the quality and structure of fermented dry beans

刘楚岑^{1,2} 谭兴和^{1,2} 张春燕^{1,2} 王 锋^{1,2} 郭红英^{1,2}
LIU Chu-cen^{1,2} TAN Xing-he^{1,2} ZHANG Chun-yan^{1,2} WANG Feng^{1,2} GUO Hong-ying^{1,2}
李清明^{1,2} 周红丽^{1,2} 刘宗敏^{1,2} 王栏树³ 严钦武⁴
LI Qing-ming^{1,2} ZHOU Hong-li^{1,2} LIU Zong-min^{1,2} WANG Lan-shu³ YAN Qin-wu⁴

(1. 湖南农业大学食品科技学院, 湖南 长沙 410128; 2. 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128;
3. 湖南佳宴食品有限公司, 湖南 长沙 410000; 4. 湖南插旗菜业有限公司, 湖南 岳阳 414000)
(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Changsha, Hunan 410128, China;
3. Hunan Jiayan Food Company Limited, Changsha, Hunan 410000, China;
4. Hunan Cha Qi Vegetables Industry Company Limited, Yueyang, Hunan 414000, China)

摘要:以干豇豆为原料,采用自然发酵法,研究水分添加量对豇豆发酵过程中品质变化的影响。结果表明:在发酵过程中,产品品质整体表现为,pH 值呈下降趋势;除 12% 添加量外,水分越高,总酸含量越高;每组都有亚硝峰产生,水分添加量为 16%,20% 时,产品亚硝酸盐峰迟于其余 3 组,并且峰值更低;挥发酯含量先上升随后趋于平缓;水分添加量为 14%,16%,18% 时,挥发酸含量相对较高;第 32 天时,16% 水分添加量产品的氨基酸含量大于其它组;发酵豇豆硬度、胶黏性、咀嚼性随水分含量的升高均呈先下降后上升的趋势。说明水分含量过高、过低,均不利产品的品质,当水分添加量为 14%~16% 时得所产品的品质最好。

关键词:发酵;蔬菜;豇豆;水分添加量

Abstract: This paper used dried cowpea as materials to study the different proportion of water which effected the quality of cowpea with wild fermentation method. The results showed that, during the fermentation process, with the addition of water, the cowpea's pH value decreased. The total acid content increased with the water addition except when the amount of water was 12%. The peak of nitrite was slower and lower than others when proportion of water was 16% and 20%. The content of volatile ester increased firstly, then keep invariability. And the content of volatile ester was higher than the

proportion of water was 14%,16% and 18%. After 32 days, the amino acid contents which the water addition was 16% higher than other treatments; with the increased of water content, the cowpea's hardness, adhesive and chewiness were decreased at first, then increased. Taken together, when the proportion of water was between 14%~16%, the quality of cowpea with wild fermentation method was the best.

Keywords: fermentation; vegetable; *Vigna unguiculata*; water addition

豇豆(*Vigna unguiculata*)又被称为豆角,是盛产于夏秋两季的大宗蔬菜,味道及口感鲜嫩。豇豆含有丰富的营养成分(Vc 190 mg/kg、蛋白质 1.5 g/100 g、叶绿素 160 mg/kg、可溶性固形物 10.15 g/100 g、有机酸 0.2 g/100 g)^[1],被称为“蔬菜中的肉类”。豇豆呼吸强度大于普通蔬菜,极不耐贮藏。发达国家通常将其进行脱水处理,以延长贮藏期,降低损耗率和运输费用^[2];中国常将豇豆发酵,利用乳酸菌来保藏豇豆,发酵豇豆是中国传统美食,因酸爽、适口、开胃特点,被视为佐餐佳品,俗称为“酸豆角”。发酵豇豆中含有丰富的乳酸菌,乳酸菌是一种益生菌,有调节肠道内微生物结构,抑制有害微生物生长和繁殖等多种保健功能^[3-4],其在发酵过程中起着主导作用。

鲜豇豆具有季节性、无法保证全年制作发酵豇豆。采用干豇豆代替鲜豇豆作为发酵原料,可调节豇豆淡旺季保证原料周年供应,并提高豇豆的附加值,丰富产品形式,当前,对于发酵干制蔬菜的研究还停留在初期阶段。微生物在适宜

基金项目:湖南省重点研发计划(编号:2016NK2113)
作者简介:刘楚岑,女,湖南农业大学在读硕士研究生。
通信作者:谭兴和(1959—),男,湖南农业大学教授,博士。
E-mail: xinghetan@163.com
收稿日期:2017-05-24

的水分活度下,才能进行正常生理活动;水分活度过低到一定程度时,乳酸菌会停止生长;水分活度过高时,利于腐败细菌与有害菌的生长,从而导致产品发酵失败^[5-6]。有人^[7]曾采用不同水分的腌制方法来腌制豇豆,但是并未设置水分添加量,为了进一步了解发酵豇豆产品质量与水分梯度的关系,本试验设置了 12%,14%,16%,18%,20% 5 个水分添加量,通过研究产品 pH 值、总酸、亚硝酸盐、挥发酯、挥发酸、游离氨基酸的动态变化,结合感官评价和质构测定,探究水分梯度对发酵豇豆的质量影响,以期为发酵干制蔬菜的工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

豇豆(*Vigna unguiculata*):湖南省插旗菜业有限公司;
辣椒(*Capiscum annuum*):红线椒,水分含量为(52.50±0.01)%,市售;
雪天海藻碘盐:湖南省湘澧盐化有限责任公司;
金龙鱼菜籽油:益海嘉里粮油工业有限公司;
亚铁氰化钾、乙酸锌、冰醋酸、硼酸钠、盐酸、对氨基苯磺酸、乙酸萘乙二胺、亚硝酸钠、磷酸、硫酸、酚酞乙醇、甲醛:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:京制 00000249 型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;
可见分光光度计:WFJ7200 型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;
磁力加热搅拌器:78-1 型,金坛市医疗仪器厂;
精密酸度计:PHS-3C 型,上海精密科学仪器有限公司;
质构仪:TA.XT.Plus.型,英国 Stable Micro Systems 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 干豇豆的制备 选取新鲜豇豆清洗干净,热烫后经太阳晾晒至水分含量为(13.18±0.01)%。

1.3.2 剁辣椒制备 将新鲜辣椒清洗干净,晾干表面明水,切分成 1~2 cm 长的小块,按照辣椒与食盐 9:1 的比例加入食盐,拌匀,装坛,压紧、留 1 cm 顶隙,加坛盖,油封,自然温度下发酵制成剁辣椒。发酵 50 d 后,测得水分含量为(52.50±0.01)%。

1.3.3 豇豆处理与发酵 将干豇豆清洗干净,沥干后测定其

含水量为(35.10±0.01)%时,切分成 2 cm 长条。取一定量的豇豆,以总重量定为 100%,加入剁辣椒 40%,食盐 6%,新鲜豇豆水分含量为(92.33±0.01)%,经过预试验后,决定设置为添加 12%,14%,16%,18%,20%的清水,拌匀、装坛、压紧、加盖,在自然温度下发酵,每隔 5 d 测亚硝酸盐和 pH 值,每隔 15 d 测游离氨基酸、挥发酸、挥发酯,90 d 时进行感官评价与质构检测。

1.4 检测项目及方法

1.4.1 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016 中的直接干燥法执行。

1.4.2 pH 值与总酸含量的测定

(1) pH 值测定:按 GB 5009.237—2016 执行。

(2) 总酸测定:按 GB/T 12456—2008 执行,以乳酸计。

1.4.3 亚硝酸盐含量的测定 按 GB/T 5009.33—2010 执行。

1.4.4 挥发酯含量的测定 参考文献[8]。

1.4.5 挥发酸含量的测定 按 GB/T 10467—1989 执行。

1.4.6 游离氨基酸含量的测定 参考文献[9]。

1.4.7 质构检测 根据文献[10]应用质构分析仪进行测定,测试模式为 TPA,采用适配探头类型 SMS P/36R,测定参数:测前速度 3.0 mm/s,测中速度 1.0 mm/s,测后速度 1.0 mm/s;压缩比 50%;两次下压间隔时间 10.0 s。测试项目包括发酵豇豆的硬度、弹性、脆性、咀嚼性、胶黏性、黏性、回复性和黏聚性。

1.4.8 感官评定 根据文献[11]先观察色泽形态,闻气味,取 40 g 样品加入食用油 5 g,清炒后入口进行评价。由 10 名经过训练的评定员按表 1 从 5 个方面打分,评分比为 1:1:2:3:3,总分 100 分。

2 结果与分析

2.1 对 pH 值和总酸含量的影响

pH 值与总酸含量,在一定程度上反映发酵进度。发酵过程是一个乳酸菌利用发酵底物不断产酸的过程,pH 值和酸度不仅会影响发酵豇豆的风味,也会影响产品中乳酸菌的生长环境,随着酸度增加,有害菌的生长受到抑制,发酵主导菌不断变化^[12]。

由图 1(a)可知,随着发酵时间延长,pH 值总体呈先下降后趋于平缓的趋势,发酵 16~36 d 时,20%组 pH 值下降速度快于其余 4 组,12%,14%组 pH 值下降趋势较其它 3 组

表 1 感官评价评定标准						
Table 1 Sensory evaluation index evaluation criteria						
分数	色泽	形态	气味	滋味	质地	
2(很差)	发暗	完全破坏	发臭有腐烂味	过酸或酸味过淡	软烂	
4(较差)	略暗	部分破坏	略有异味	酸味勉强接受	较软	
6(一般)	略白	略有破坏	无发酵香	酸味一般	一般	
8(较好)	绿混白	基本无损伤	发酵香清淡	酸味适中	较脆	
10(很好)	较绿	完整	发酵香浓郁	酸爽可口	脆嫩	

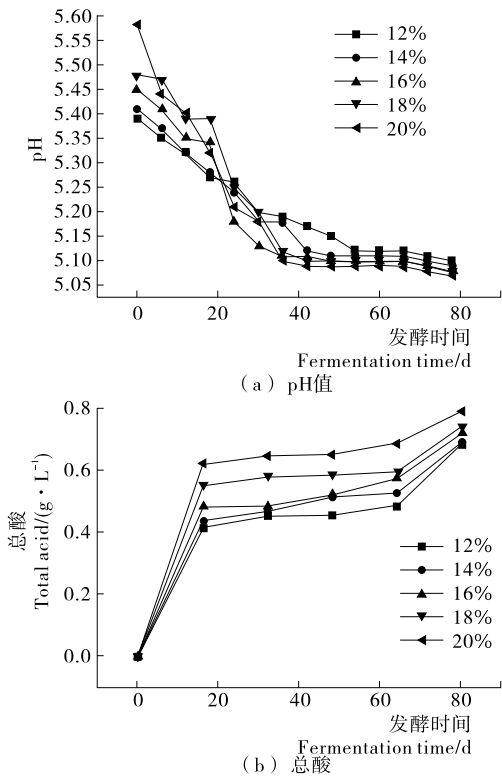


图 1 水分添加量对发酵过程中豇豆 pH 值与总酸的影响
Figure 1 Water gradient in the process of cowpea fermentation pH and total acid change ($n=2$)

更为平缓。发酵 30 d 时,16% 组 pH 值明显低于其它几组。从整体上看,pH 值变化不明显,可能是食盐浓度过高抑制乳酸菌生长^[13]。由图 1(b)可知,总酸总体呈上升趋势,在发酵前 16 d,水分添加量越高,总酸含量上升越快。综上,说明水分添加量是影响其发酵的重要因素,在一定范围内,水分添加量越高,发酵速度越快。

2.2 对亚硝酸盐含量的影响

由图 2 可知,随着时间延长,都出现了亚硝峰。水分添加量为 18% 时,亚硝峰出现时间早于其它 4 组,且其峰值显著高于其它 4 组的($P<0.05$)。16%,20% 组亚硝峰出现最迟且峰值最小,可能是这 2 组产生的抑菌物质浓度高于其余组^[14],或者乳酸菌生长活力更旺盛^[15]。从整体看,16%~

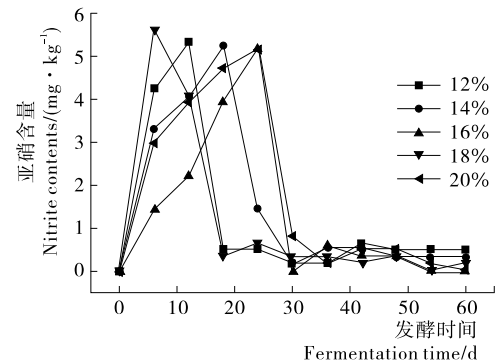


图 2 水分添加量对发酵过程中豇豆亚硝酸盐含量的影响
Figure 2 Water gradient of cowpea fermentation process the influence of the change of nitrite content ($n=2$)

20% 水分添加量较优。根据行业标准 NY/T 437—2012《绿色食品酱腌菜》中的规定,酱腌菜中亚硝酸盐含量应低于 4 mg/kg,观察图 2 发现,发酵 30 d 后,亚硝酸盐含量均低于 4 mg/kg,因此主要观察 30 d 后每组发酵产品的品质。

2.3 对挥发酯含量的影响

挥发酯是发酵豇豆中香味的主要来源物质,是一部分发酵风味物质的总和(如乙酸乙酯),通过测定挥发酯,可判断风味物质变化趋势^[16-17]。由图 3 可知,随着水分添加量的升高,挥发酯均先上升后保持小幅度波动,发酵 32 d 时,12% 组挥发酯含量最低,16% 组含量最高,说明水分添加量 12% 时过低,不利于挥发酯的产生,16% 时最适于挥发酯的产生,因此 16% 水分添加量比较适宜。32 d 后整体趋近平缓,且每组间有显著性差异($P<0.05$)。

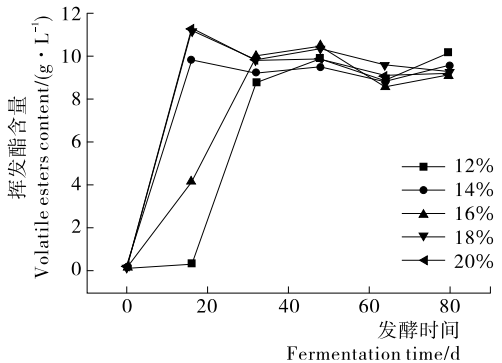


图 3 水分添加量对发酵过程中豇豆挥发酯含量的影响
Figure 3 Water gradient of cowpea in the fermentation process by the change of volatile esters ($n=2$)

2.4 对挥发酸含量的影响

发酵蔬菜有独特的发酵风味,挥发酸是以游离状态或以盐的形式存在的所有乙酸等脂肪酸的总和,是反映风味的主要成分之一^[18]。由表 2 可知,随着时间延长,12%,14% 组挥发酸含量先快速上升再下降,随后继续上升,可能是水分添加过少会导致产挥发酸微生物的活动受到影响,挥发酸产生量低于挥发量时,其含量轻微下降,直到末期再继续上升^[19]。16% 组一直为上升趋势,前 16 d,18% 组上升速度明显快于其它 4 组,32~64 d 时,12%,14%,18%,20% 呈先上升再下降的趋势。这可能是发酵过程中的主导微生物在改变,其生长繁殖所需要的适宜水分含量也在变化^[20]。综上所述,适当提高水分添加量,能使产品中挥发酸含量上升,但提高过多会导致含量显著降低,因此水分添加量可取中间值 14%~18%。

2.5 对游离氨基酸含量的影响

豇豆中含有丰富的蛋白质,可在蛋白酶作用下分解成多种氨基酸。氨基酸是一种滋味物质,具有鲜味、甜味,如:天门冬氨酸等具有鲜味,其是发酵豇豆中风味物质重要构成成分^[21]。由图 4 可知,随着发酵时间延长,16%,18%,20% 组总体呈先上升再下降的趋势,16 d 时达到峰值,且 20% 组与其它 2 组相比有显著性差异($P<0.05$)。12%,14% 组中游离氨基酸前 16 d 上升速度慢于其它 3 组,但是一直保持上升

表 2 水分添加量对发酵过程中豇豆挥发酸含量的影响[†]

Table 2 Water gradient of cowpea volatile acid in fermentation process of change (n=2) g/100 g						
发酵时间/d	12%	14%	16%	18%	20%	
16	0.28±0.07	0.41±0.03	0.31±0.12	0.50±0.01	0.35±0.01	
32	0.41±0.06 ^a	0.48±0.04 ^{ab}	0.37±0.03 ^{ab}	0.41±0.04 ^b	0.46±0.01 ^{ab}	
48	0.44±0.03	0.58±0.08	0.47±0.00	0.60±0.02	0.58±0.00	
64	0.42±0.04	0.44±0.01	0.57±0.01	0.59±0.05	0.51±0.04	
80	0.62±0.00 ^a	0.63±0.05 ^a	0.64±0.07 ^a	0.53±0.00 ^{ab}	0.45±0.01 ^b	

† 同行数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05),肩标相同字母表示差异不显著(P>0.05)。

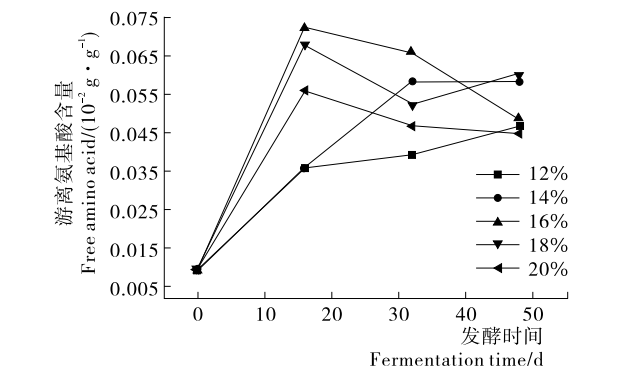


图 4 水分添加量对发酵过程中豇豆游离氨基酸含量的影响
Figure 4 Water gradient of free amino acid change in cowpea fermentation process (n=2)

趋势,说明水分含量影响蛋白质分解速度。发酵 32 d 时,游离氨基酸含量顺序为 16%组>14%组>18%组>20%组>12%组,且经 SPSS 分析,每组间无显著性差异,但是明显高水分和低水分都不利于游离氨基酸的产生。

2.6 对质构的影响

由表 3 可知,随着水分添加量的提高,发酵豇豆的硬度、咀嚼性、胶黏性基本呈先下降后上升趋势,黏结性、回复性随

着水分添加量的增高,较为稳定,每组之间无显著性差异(P>0.05)。当水分添加量为 18%,20%时,硬度与其它 3 组相比有显著性差异(P<0.05);12%组硬度最大。当水分添加为 14%时,产品弹性达到最大值,且与 12%,16%组相比有显著性差异(P<0.05),产品咀嚼性达到最大值,硬度也偏高。综合考虑,添加 16%~20%的水为宜。

2.7 对感官品质的影响

由表 4 可知,随着水分添加量的增加,产品色泽与形态变化不明显,每组间无显著性差异(P>0.05)。前 4 组气味、口味的变化无显著性差异(P>0.05),但 20%组打分明显偏低,与其它 4 组相比有显著性差异(P<0.05)。产品质地评分与总评分,总体呈先上升后下降的趋势,16%组质地评分最高,20%组评分最低,2 组具有显著性差异(P<0.05)。从总评分来看,20%组评分明显低于其它 4 组,但是与 12%组相比无显著性差异,说明水分添加量过高、过低都会影响产品的品质。

3 结论

通过改变水分添加量,研究了其对发酵豇豆 pH 值、总酸、亚硝酸盐、挥发酯、挥发酸、游离氨基酸、质构、感官评价的影响。结果表明,随着水分添加量的提高,pH 值降低,总

表 3 水分添加量对发酵豇豆质构指标的影响[†]

Table 3 Effect of water gradient on texture properties of fermentation vigna unguiculata (n=2)						
水分添加量/%	硬度/N	弹性/Pa	黏结性/P	胶黏性/P	咀嚼性/N	回复性
12	627.3±121.2 ^a	0.80±0.05 ^{ab}	0.71±0.07 ^a	439.0±144.3 ^b	349.5±114.4 ^b	0.24±0.03 ^a
14	619.7±24.9 ^a	0.99±0.02 ^c	0.70±0.06 ^a	351.5±144.8 ^{ab}	362.5±152.1 ^b	0.24±0.03 ^a
16	228.2±81.1 ^a	0.76±0.12 ^a	0.71±0.09 ^a	151.7±41.7 ^a	110.0±36.7 ^a	0.22±0.02 ^a
18	151.5±40.0 ^b	0.93±0.07 ^{bc}	0.75±0.06 ^a	115.9±40.9 ^a	109.6±45.4 ^a	0.24±0.03 ^a
20	273.3±72.9 ^b	0.87±0.04 ^{abc}	0.73±0.10 ^a	245.4±115.9 ^{ab}	259.4±67.0 ^{ab}	0.22±0.02 ^a

† 同列数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05),肩标相同字母表示差异不显著(P>0.05)。发酵天数为 90 d。

表 4 5 种水分添加量对发酵豇豆感官评分的影响

Table 4 The sensory evaluation of fermentation vigna unguiculata with five water gradient (n=2)						
水分添加量/%	色泽	形态	气味	口味	质地	总分
12	6.06±2.82 ^a	6.06±2.94 ^a	15.28±0.18 ^a	24.12±2.20 ^a	21.30±5.00 ^{ab}	72.82±12.38 ^{ab}
14	6.40±2.15 ^a	7.10±2.15 ^a	18.00±1.26 ^a	23.76±3.32 ^a	22.68±3.95 ^{ab}	77.94±9.27 ^a
16	7.08±2.52 ^a	8.36±1.18 ^a	13.96±3.82 ^a	24.48±2.87 ^a	26.36±1.63 ^b	80.24±10.97 ^a
18	7.84±1.50 ^a	8.10±1.12 ^a	17.08±0.91 ^a	24.42±2.00 ^a	22.68±2.80 ^{ab}	80.12±5.86 ^a
20	6.80±2.04 ^a	6.96±2.24 ^a	8.88±3.82 ^b	18.00±5.91 ^b	18.66±5.90 ^a	59.30±17.12 ^b

† 同列数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05),肩标相同字母表示差异不显著(P>0.05)。发酵天数为 90 d。

酸、挥发酯增高;16%,20%组,亚硝酸盐峰迟于其余 3 组,且峰值更低;挥发酸含量先上升后下降;14%,18%组,蛋白质分解成氨基酸的效率高于其余 3 组;发酵豇豆硬度、胶黏性、咀嚼性,基本呈先下降后上升的趋势;感官评定结果表明,水分添加量过低、过高,都对产品感官和品质有不利影响。单从水分来看,添加 14%~16%的水能保证产品品质较好,发酵 30 d 后,符合绿色食品的要求(4 mg/kg)。

本试验对干豇豆的发酵条件进行了初步试验,在其他条件一定时,发现水分对发酵结果起到了一定的影响。但豇豆的其它发酵条件仍需进一步的探索。

参考文献

[1] 罗铭泳,姚詹武,陈东康,等. 豇豆的营养成分分析及保健功能[J]. 中国果菜, 2006(2): 40-40.

[2] 程小兵,熊建华. 豇豆的贮藏和脆片加工技术[J]. 中国果菜, 2017(1): 8-10.

[3] XIONG Tao, SONG Su-hua, HUANG Xu-hui, et al. Screening and identification of functional lactobacillus specific for vegetable fermentation[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(1): M84-M89.

[4] SHARMA V, MISHRA H N. Fermentation of vegetable juice mixture by probiotic lactic acid bacteria[J]. Nutra Foods, 2013, 12(1): 17-22.

[5] KETS E, TEUNISSEN P, BONT J D. Effect of compatible solutes on survival of lactic acid bacteria subjected to drying[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1996, 62(1): 259-261.

[6] BARBOSA J, BORGES S, TEIXEIRA P. Effect of different conditions of growth and storage on the cell counts of two lactic acid bacteria after spray drying in orange juice[J]. Beverages, 2016, 2(2): 8.

[7] 李雨枫,谢靓,蒋立文,等. 不同发酵工艺对酸豆角品质的影响[J]. 中国酿造, 2015, 34(2): 64-67.

[8] 谭亦成,谭兴和,刘甜甜. 腌制方法对酸豆角质量的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(4): 32-34.

[9] 汤春兰,杨文珍. 电位滴定法测定食品中游离氨基酸[J]. 天津化工, 1999(3): 35-37.

[10] 郭秀兰,唐仁勇,刘达玉,等. 盐分腌制对大头菜滋味、质构和挥发性成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(1): 51-54.

[11] 张婷,杨波,罗瑞明,等. 苦苦菜发酵过程中主要发酵菌种及滋味物质的变化[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 23-27.

[12] DI C R, CODA R, DE A M, et al. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation[J]. Food Microbiology, 2013, 33(1): 1-10.

[13] 胡博涵,吴晖,赖富饶,等. 耐盐乳酸菌的筛选及其在剁辣椒发酵中的应用[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 51-54.

[14] 陈兵,田波,原韬,等. 酸菜发酵液中抑菌物质的提取与鉴定[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 123-125.

[15] 何淑玲. 泡菜发酵过程中亚硝酸盐生成和降解机理的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006: 1-45.

[16] 张锐,吴祖芳,沈锡权,等. 榨菜低盐腌制过程的微生物群落结构与动态分析[J]. 中国食品学报, 2011, 11(3): 175-180.

[17] CHEN Xuan, ZHANG Yan, CHEN Yu-long, et al. Research progress on the formation mechanism and analysis technics of flavor in fermented vegetables[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science & Technology, 2014, 14(2): 217-224.

[18] 钟敏,宁正祥. 辣椒自然乳酸发酵中的变化及影响发酵质量的几个因素[J]. 食品与机械, 2001(6): 13-14.

[19] 李胜元,谷向春,肖冬光. 荔枝酒发酵过程中挥发酸含量的控制[J]. 酿酒科技, 2007(2): 65-66.

[20] 陈弦,张雁,陈于陇,等. 发酵蔬菜风味形成机制及其分析技术的研究进展[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 217-224.

[21] WU Jin-hai. Influence of changes of fermentation ways on texture and anti-oxidation performance of vegetable-pickle with flavor of garlic[J]. Food & Fermentation Industries, 2007, 33(12): 26-28.

(上接第 49 页)

[13] 徐德阳,王莉莉,杜春梅. 微生物共培养技术的研究进展[J]. 微生物学报, 2015, 55(9): 1 089-1 096.

[14] 雷群英. 大米中镉的微生物法脱除及其应用品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 11-19.

[15] 王锋,鲁战会,薛文通,等. 浸泡发酵大米成分的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2003(1): 11-14.

[16] 国家卫生计生委. GB 5009.15—2014 食品中镉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[17] 赵德安. 混合发酵与纯种发酵[J]. 中国调味品, 2005(3): 3-8.

[18] BERTRAND S, BOHNI N, SCHNEE S, et al. Metabolite induction via microorganism co-culture: a potential way to enhance chemical diversity for drug discovery[J]. Biotechnology Advances, 2014, 32(6): 1 180.

[19] 傅亚平,吴卫国,王巨涛. 乳酸菌发酵脱除大米粉中重金属镉的机理[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(3): 104-108.

[20] 曾晓希. 抗重金属微生物的筛选及其抗镉机理和镉吸附特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 61-69.

[21] 冯镇,张兰威. 乳酸菌发生自溶的影响因素研究[J]. 中国乳品工业, 2003, 31(3): 7-9.

[22] 王婷婷. 微生物对重金属的吸附作用及其影响因素[J]. 生物学教学, 2012, 37(11): 9-10.

[23] 张海欧,周维芝,马玉洪,等. 微生物胞外聚合物对重金属镉的解毒作用及红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(11): 3 041-3 043.

[24] 杨彦平. 三株嗜酸性微生物表面质子及重金属吸附行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 31-77.

[25] KINOSHITA H, SOHMA Y, OHTAKE F, et al. Biosorption of heavy metals by lactic acid bacteria and identification of mercury binding protein[J]. Research in Microbiology, 2013, 164(7): 701.

[26] GHORBANI F, YOUNESI H, GHASEMPOURI S M, et al. Application of response surface methodology for optimization of cadmium biosorption in an aqueous solution by Saccharomyces cerevisiae[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 145(2): 267-275.