

无糖藜麦发酵乳的物化特性及抗氧化活性

Effect of sugar-free quinoa addition on the physicochemical properties and antioxidant activity of fermented milk

张 裕¹ 王 颖^{1,2,3,4} 李志芳¹

ZHANG Yu¹ WANG Ying^{1,2,3,4} LI Zhi-fang¹

王 迪¹ 张艳莉¹ 张 邯¹

WANG Di¹ ZHANG Yan-li¹ ZHANG Han¹

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319; 3. 粮食副产物加工与利用教育部工程研究中心, 黑龙江 大庆 163319; 4. 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 3. Engineering Research Center of Processing and Utilization of Grain By-products, Ministry of Education, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 4. Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Ministry of Education, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:目的:开发有益于身体健康的无糖风味发酵乳。方法:在复原乳中添加藜麦浆,以木糖醇替代蔗糖经发酵后得无糖藜麦发酵乳,以酸度、黏度、持水力等物化特性及体外抗氧化为评价指标,探究藜麦浆对无糖发酵乳的影响。结果:添加藜麦浆的发酵乳 pH 高于普通发酵乳,酸度、黏度、持水力则略低于普通发酵乳,且无糖藜麦发酵乳的 DPPH 自由基清除率(86.23%)、ABTS 自由基清除率(71.32%)、羟基自由基清除率(63.27%)、Fe³⁺还原能力(0.48 mmol/L)均高于普通发酵乳。结论:添加木糖醇和藜麦浆会改变发酵乳的物化性质,同时提高发酵乳的抗氧化活性。

关键词:藜麦浆;无糖发酵乳;物化特性;抗氧化活性

Abstract: Objective: this study focuses on developing a kind of sugar-free fermented milk with beneficients to health. Methods: quinoa pulp was added to the reconstituted milk, with xylitol

used to replace sucrose. The physicochemical properties, including acidity, viscosity, water holding capacity and *in vitro* antioxidant were measured to explore the effect of quinoa pulp on sugar free fermented milk. Results: the pH of fermented milk with quinoa pulp was higher than that of ordinary fermented milk, while the acidity, viscosity and water holding capacity were slightly lower than that of ordinary fermented milk. The DPPH radical scavenging rate (86.23%), ABTS radical scavenging rate (71.32%), hydroxyl radical scavenging rate (63.27%) and Fe³⁺ reducing capacity (0.48 mmol/L) of the sugar-free fermented milk was higher than those of ordinary fermented milk. Conclusion: it is proved that the addition of xylitol and quinoa pulp can change the physicochemical properties of fermented milk and improve the antioxidant activity of fermented milk, which can provide some theoretical support for functional fermented milk.

Keywords: quinoa slurry; sugar-free fermented milk; physicochemical properties; antioxidant activity

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFE0206300);黑龙江省自然科学基金研究团队项目(编号:TD2020C003);“黑龙江省杂粮优势特色学科”资助项目(编号:黑教联[2018]4号);黑龙江省自然基金面上项目(编号:C2018047);黑龙江八一农垦大学“三横三纵”科研团队支持计划(编号:TDJH201806)

作者简介:张裕,女,黑龙江八一农垦大学在读硕士研究生。

通信作者:王颖(1979—),女,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail: wychen156@163.com

收稿日期:2021-03-07

藜麦(*Chenopodium quinoa*)是一种极具工业价值的伪谷物,被认为是适合所有人的植物性食品,可作为健康意识较强的消费者、素食者及运动员等人群的主要膳食选择^[1]。与多数杂粮作物相比,其蛋白利用率更高,氨基酸构成平衡且接近牛奶酪蛋白,并含有甜菜碱、槲皮素、皂苷等营养功能因子^[2]。藜麦种子是酚类化合物的良好

来源,呈现出相对较高的抗氧化潜能,其中酚酸、类黄酮和单宁组成了具有生物活性的次生植物代谢产物,有助于多种生理特性,如抗菌、抗氧化、抗炎、抗肿瘤和抗癌作用。植物中酚类物质和类黄酮含量是影响其抗氧化活性的关键因素,由于抗氧化机制复杂,一种抗氧化剂在体内可能有多种抗氧化机制,因此常常需要通过测定多个抗氧化指标来综合评价植物的抗氧化能力,如自由基清除能力、三价铁还原能力、螯合金属能力等^[3-4]。董晶等^[6]通过对自由基清除率和消化淀粉酶抑制率的测定,证明藜麦黄酮提取液具有较好的抗氧化活性和降糖能力。不同藜麦品种抗氧化能力的变化与高浓度的多酚化合物有关,这可能归因于种皮的色泽,颜色越深则表现出越强的抗氧化能力和抗癌作用^[6]。藜麦蜕皮激素可通过抑制皮肤胶原酶活性表现出抗氧化性^[7]。乳酸菌等有益微生物利用原料乳可在发酵代谢过程中产生有机酸、维生素、氨基酸、酶类等小分子化合物,大大提高其营养价值,且藜麦本身含有大量活性物质成分,使其表现出一定的功能特性,因此在原料乳中添加藜麦浆将对发酵乳产生很大的影响^[8-9]。木糖醇、低聚糖、赤藓糖醇等甜味剂与蔗糖甜度相近,食用后不仅不参与体内葡萄糖代谢,还具有减脂、防止龋齿、减少牙斑形成等功效,将发酵乳中的蔗糖替换成甜味剂,可制成适合患有高血糖症或糖尿病等特殊人群食用的产品^[10-11]。

藜麦发酵乳是以藜麦浆和复原乳为原料,利用乳酸菌发酵产酸而成的风味型营养乳制品,但目前市场上的发酵乳多用蔗糖调节风味,长期饮用不利于人体健康,并且中国对于藜麦发酵乳研究大多侧重于其加工工艺,而添加藜麦浆后有关其对发酵乳物理品质及抗氧化性方面的影响尚缺乏系统深入研究。文章拟以无糖藜麦发酵乳为主要研究对象,以无糖藜麦发酵乳的 pH、酸度、黏度、持水力、DPPH 自由基清除能力、Fe³⁺ 还原能力、ABTS 自由基清除能力及羟自由基清除能力为测定指标,探究添加木糖醇和藜麦浆对无糖发酵乳的物化特性及抗氧化活性的影响,以期与其他无糖风味发酵乳系列产品的功能性研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红藜麦:青海善祺藜麦商贸有限公司;

脱脂奶粉、全脂奶粉:黑龙江双城雀巢有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS):美国 Sigma 公司;

羟自由基测试盒:南京建成生物工程研究所;

氢氧化钠、氯化铁:分析纯,辽宁泉瑞试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:BS224S 型,赛多利斯科学仪器有限公司;

pH 计:pHS-3C 型,上海精密科学仪器有限公司;

旋转黏度计:NDJ-1B 型,上海方瑞科学仪器有限公司;

分光色差计:CM-700D 型,杭州柯盛行仪器有限公司;

高速冷冻离心机:H1850R 型,湖南湘仪仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:A360 型,上海翱艺仪器有限公司。

1.3 试验方法

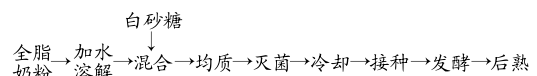
1.3.1 菌种活化 参照余芳^[12]的方法并修改。将甘油保存的植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌分别接种于灭菌后的 MRS 液体培养基中,摇匀,37 ℃ 培养 24 h,在无菌操作台中挑取菌液,采用平板划线法接入 MRS 固体培养基中,37 ℃ 培养 24 h,连续传代 3 次,使其充分活化,挑取斜面培养基生长较好的菌落接种至 MRS 液体培养基中,37 ℃ 培养 24 h,8 000 r/min 离心 10 min,收集菌体后加入灭菌的生理盐水清洗两次后制成菌数为 10⁹ CFU/mL 菌悬液,于 4 ℃ 保存备用。

1.3.2 工艺流程

(1) 无糖藜麦发酵乳:



(2) 普通发酵乳:



经前期研究得无糖藜麦发酵乳最佳工艺为藜麦浆添加量 30%,木糖醇添加量 5%、复合发酵剂接种量 3% ($m_{\text{植物乳杆菌117-1}} : m_{\text{嗜酸乳杆菌KLDS1.0901}}$ 为 2 : 1)、发酵温度 38 ℃、发酵时间 8 h。

1.3.3 pH 值测定 采用 pH 计。

1.3.4 酸度测定 参照苏敦等^[13]的方法,并按式(1)计算酸度。

$$W = \frac{C \times V \times 100}{M \times 0.1}, \quad (1)$$

式中:

W——酸度,°T;

C——NaOH 溶液浓度, mol/L;

V——滴定样品时消耗 NaOH 溶液的体积, mL;

M——发酵乳样品体积, mL。

1.3.5 黏度测定 采用旋转黏度计。

1.3.6 持水力测定 参照雷勇刚^[14]的方法,按式(2)计算持水力。

$$L = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

L ——持水力, %;

M_1 ——离心前样品和离心管的质量, g;

M_2 ——离心后除去乳清样品和离心管的质量, g。

1.3.7 色泽测定 采用色差仪。

1.3.8 DPPH 自由基清除率测定 参照童秦怡^[15]的方法, 并按式(3)计算 DPPH 自由基清除率。

$$C = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

C_1 ——DPPH 自由基清除率, %;

A_1 ——样品+DPPH 溶液的吸光度;

A_2 ——样品+无水乙醇的吸光度;

A_0 ——DPPH 溶液的吸光度。

1.3.9 ABTS 自由基清除率测定 参照郑金熊等^[16]的方法, 并按式(4)计算 ABTS 自由基清除率。

$$C = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

C_2 ——ABTS 自由基清除率, %;

A_0 ——0.5 mL 蒸馏水 + 3.5 mL ABTS 溶液的吸光度;

A_1 ——0.5 mL 样品 + 3.5 mL ABTS 溶液的吸光度;

A_2 ——0.5 mL 样品 + 3.5 mL 无水乙醇的吸光度。

1.3.10 羟自由基($\cdot\text{OH}$)清除率测定 参照羟自由基测试试剂盒说明书。

1.3.11 Fe^{3+} 还原力测定 参照杨淑妮^[17]的方法。

1.4 数据处理

所有试验均平行 3 次, 结果用平均值±标准差表示。用 Excel、SPSS 软件进行数据的录入与处理。

2 结果与分析

2.1 无糖藜麦发酵乳的物化特性

2.1.1 物化指标 由表 1 可知, 无糖藜麦发酵乳的酸度显著低于普通发酵乳, 而 pH 值则相反, 这是由于无糖藜麦发酵乳中添加了藜麦浆, 导致复原乳在原料中占比低, 其乳糖含量总体减少, 而乳酸菌发酵机理就是乳酸菌利用原料中的乳糖产生乳酸, 因此最终产品酸度下降, pH 值上升。黏度形成原理是乳酸菌发酵原料中的糖类产生胞外多糖, 其中包含了具有黏附性的荚膜多糖和黏液多糖, 持水力的形成是由于脂肪经均质破裂成微小脂肪球, 均匀分布于发酵底物, 导致与蛋白质吸附表面积增加, 使酪蛋白结构变化发生凝胶网络的聚集^[18]。无糖藜麦发酵乳中以脱脂乳粉为底物、木糖醇替代蔗糖, 使其中糖类物质和脂肪含量均低于普通发酵乳, 因此产品黏度和持水力降低, 同时蛋白质含量的减少也会使发酵乳的黏度和持水力下降^[19], 因此无糖藜麦发酵乳的黏度和持水力低

于普通发酵乳。

2.1.2 色泽 由表 2 可知, 无糖藜麦发酵乳的 L^* 值略低于普通发酵乳, 而 a^* 值和 b^* 值则相反($P < 0.05$), 可能是由于添加了红色藜麦浆的原因, 显著增加了其彩色值, 而组间 L^* 无显著性差异, 在消费者可接受范围之内。

表 1 无糖藜麦发酵乳和普通发酵乳的物化指标[†]

Table 1 Comparison of physical and chemical indexes between sugared quinoa fermented milk and common fermented milk

样品	pH	酸度/ °T	黏度/ (Pa·s)	持水率/ %
无糖藜麦发酵乳	4.65±0.01 ^a	77.90±1.32 ^a	2.52±0.02 ^a	59.46±1.04 ^a
普通发酵乳	4.53±0.03 ^b	89.65±0.82 ^b	2.83±0.07 ^b	64.28±0.59 ^b

† 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

表 2 无糖藜麦发酵乳和普通发酵乳的色泽[†]

Table 2 Comparison of color and lustre between sugared quinoa fermented milk and common fermented milk

样品	L^* 值	a^* 值	b^* 值
无糖藜麦发酵乳	74.36±1.18 ^a	-3.46±0.17 ^a	8.38±0.89 ^a
普通发酵乳	79.83±1.16 ^a	-2.89±0.03 ^b	3.34±0.56 ^b

† 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 无糖藜麦发酵乳的抗氧化活性

2.2.1 DPPH 自由基清除率 由图 1 可知, 无糖藜麦发酵乳的 DPPH 自由基清除率显著高于普通发酵乳, 随着发酵乳质量分数的增加, DPPH 自由基清除能力增强, 当发酵乳质量分数为 60% 时, 无糖藜麦发酵乳和普通发酵乳的 DPPH 自由基清除率分别为 (86.23±2.35)%, (76.81±3.12)%, 添加藜麦浆的发酵乳的 DPPH 自由基清除率提高了近 10%, 说明无糖藜麦发酵乳中的藜麦发挥了重要抗氧化作用。这是由于藜麦中富含多糖、多酚等物质, Vollmannova^[20] 研究证明, 荞麦、苋菜、藜麦中酚类物质和芦丁含量会直接影响其抗氧化能力, 且自由酚和结合酚占比越大, 对 DPPH 自由基清除能力越强。Gorinstein 等^[21] 报道藜麦的总酚含量为 60 mg GAE/100 g, 显著高于苋菜和小麦的, 但低于荞麦的 ($P < 0.01$)。同时利用乳酸菌发酵藜麦是生产具有抗菌、抗氧化等特殊生物活性肽的有效方法, 当藜麦多酚与乳酸菌自身抗氧化性产生协同作用时, 可进一步提高发酵乳的 DPPH 自由基清除能力。

2.2.2 ABTS 自由基清除率 由图 2 可知, 无糖藜麦发酵乳的 ABTS 自由基清除率明显高于普通发酵乳, 且发酵乳对 ABTS 自由基的清除能力随浓度的升高而增强,

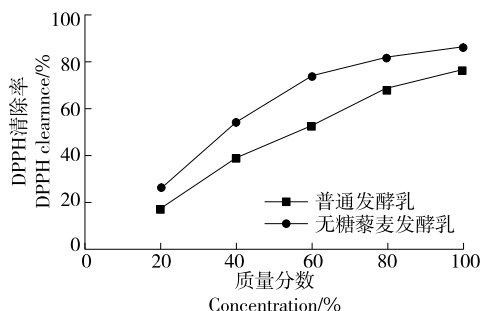


图1 发酵乳对DPPH自由基清除能力

Figure 1 Changes of DPPH free radical scavenging rate of fermented milk with different dilutions

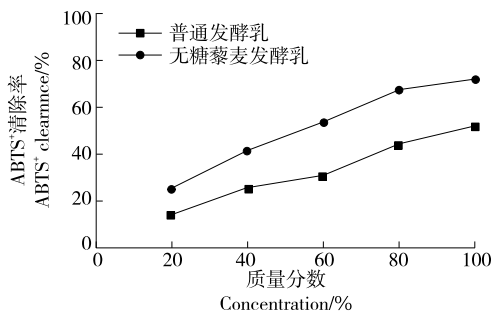


图2 发酵乳对ABTS自由基的清除能力

Figure 2 Changes of ABTS free radical scavenging rate of fermented milk with different dilutions

当发酵乳质量分数为100%时,无糖藜麦发酵乳和普通发酵乳的ABTS自由基清除率分别为 $(71.32 \pm 2.32)\%$, $(52.96 \pm 1.95)\%$,添加藜麦浆的发酵乳ABTS自由基清除率提高了近20%,说明添加藜麦浆能显著提高发酵乳对ABTS自由基的清除能力。Pereira等^[22]研究表明,藜麦种子中含有槲皮素、山奈酚、香草醛酸、阿魏酸等多种还原剂特性的酚类化合物,可在ABTS自由基清除率试验中提供氢。同时藜麦对ABTS自由基的清除能力与多酚化合物、有机酸等物质的分子数量有关,藜麦籽粒颜色越深,其酚类物质含量越高、抗氧化活性越强,试验选择的是红色藜麦,因而使无糖藜麦发酵乳显示出更高的抗氧化能力^[23]。藜麦中含有较高的黄酮,为 $36.2 \sim 144.3 \text{ mg}/100 \text{ g}$,而其他谷物大多数不含黄酮类物质,Villa等^[24]提出类黄酮含量可能是植物抗氧化活性的原因,其在ABTS试验中能够提供自由基氢以及作为还原剂的特性。

2.2.3 羟基自由基清除率 由图3可知,无糖藜麦发酵乳的羟基自由基清除率明显高于普通发酵乳,随着发酵乳质量分数的升高,无糖藜麦发酵乳和普通发酵乳的体外抑制羟基自由基能力均稳步上升,当发酵乳质量分数为100%时,羟基自由基清除率分别为 $(63.27 \pm 2.01)\%$, $(48.19 \pm 2.69)\%$,添加藜麦浆的发酵乳羟基自由基清除率提高了近15%,说明添加藜麦浆能显著提高发酵乳对羟基自由基的清除能力。这可能与藜麦中的酚类物质有

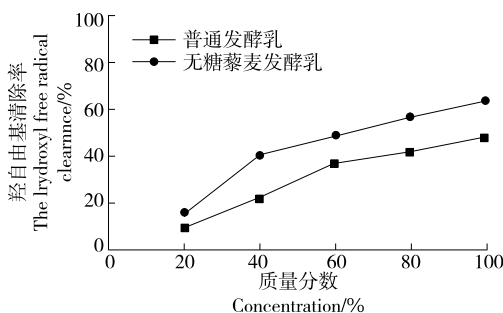
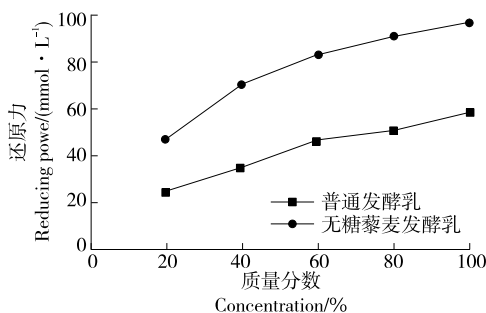


图3 发酵乳对羟基自由基的清除能力

Figure 3 Changes of hydroxyl radical scavenging rate of fermented milk with different dilutions

关,酚类物质提供活泼的氢可终止活性氧等自由基的连锁反应,以此抑制羟基自由基的产生,降低由羟基自由基所致的有害效应^[25]。Hernandez^[26]从美国藜麦种子中分离出了6种黄酮苷元,其在自由基清除试验中表现出很强的抗氧化活性。

2.2.4 Fe^{3+} 还原能力 由图4可知,无糖藜麦发酵乳的 Fe^{3+} 还原能力明显高于普通发酵乳,并随着发酵乳质量分数的不断升高而稳步上升,当发酵乳质量分数为100%时,无糖藜麦发酵乳和普通发酵乳的 Fe^{3+} 还原能力分别为 (0.48 ± 0.02) , $(0.29 \pm 0.03) \text{ mmol/L}$,说明添加藜麦浆能显著提高发酵乳对 Fe^{3+} 的还原能力。研究^[27]表明, Fe^{3+} 还原能力与物质中游离酚含量有关,藜麦经发酵后酚类物质由结合态释放为游离状态,同时乳酸菌代谢生成有机酸可有效阻止酚类物质分解,因此无糖藜麦发酵乳具有较高的 Fe^{3+} 还原能力。

图4 发酵乳对 Fe^{3+} 的还原能力Figure 4 Changes of Fe^{3+} reducing ability of fermented milk with different dilutions

3 结论

以藜麦浆和复原乳为原料,以木糖醇代替蔗糖制成无糖藜麦发酵乳,其pH高于普通发酵乳,酸度、黏度、持水力则略低于普通发酵乳,且无糖藜麦发酵乳的DPPH自由基清除率、ABTS自由基清除率、羟基自由基清除率、 Fe^{3+} 还原能力均显著高于普通发酵乳。由于藜麦本身富含多种活性物质,将其作为原料与复原乳共同发酵,提高

了发酵乳的抗氧化活性,实现了藜麦和无糖发酵乳制品的综合利用,丰富了无糖食品市场,符合目前功能性发酵乳的研究趋势。但若将藜麦应用于天然强效抗氧化剂则需对其抗氧化机理进行进一步探索。

参考文献

- [1] ELFAHR K R, VASILJEVIC T, YEAGER T, et al. Anti-colon cancer and antioxidant activities of bovine skim milk fermented by selected lactobacillus helveticus strains[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(1): 31-40.
- [2] 陈益胜, 舒蓝萍, 徐学明, 等. 3 种藜麦发芽过程中生物活性物质及其抗氧化活性的变化规律[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 34-38, 47.
CHEN Yi-sheng, SHU Lan-ping, XU Xue-ming, et al. Changes of bioactive substances and their antioxidant activities during germination of three kinds of quinoa[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 34-38, 47.
- [3] ZHANG Meng-wei, ZHANG Rui-feng, ZHANG Fang-xuan, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(13): 7 580-7 587.
- [4] SABEENAF K H, CAROLINE P B, NINA S N, et al. Antioxidant activity of yoghurt peptides: Part 2 Characterisation of peptide fractions[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1 090-1 097.
- [5] 董晶, 张焱, 曹赵茹, 等. 藜麦总黄酮的超声波法提取及抗氧化活性[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 267-269.
DONG Jing, ZHANG Yan, CAO Zhao-ru, et al. Ultrasonic extraction and antioxidant activity of total flavonoids from quinoa[J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(4): 267-269.
- [6] TAN Ming-hui, CHANG Sen-lin, LIU Jia-ning, et al. Physicochemical properties, antioxidant and antidiabetic activities of polysaccharides from quinoa (Chenopodium quinoa Willd) seeds [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2020, 25(17): 3 840.
- [7] 李玉英, 王玉玲, 王转花. 藜麦营养成分分析及黄酮提取物的抗氧化和抗菌活性研究[J]. 山西农业大学, 2018, 46(5): 729-733.
LI Yu-ying, WANG Yu-ling, WANG Zhuan-hua. Analysis of nutritional components and antioxidant and antibacterial activities of flavonoids extracts from quinoa[J]. Shanxi Agricultural University, 2018, 46(5): 729-733.
- [8] 熊荣园, 王黎明, 罗通彪, 等. 木糖醇金针菇酸奶发酵工艺研究[J]. 食用菌, 2019, 41(6): 65-68.
XIONG Rong-yuan, WANG Li-ming, LUO Tong-biao, et al. Study on fermentation technology of xylitol Flammulina velutipes [J]. Edible Fungi, 2019, 41(6): 65-68.
- [9] 刘洋. 低糖复合发酵乳工艺优化研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(10): 188-192.
LIU Yang. Optimization of low sugar compound fermented milk[J]. Brewed in China, 2020, 39(10): 188-192.
- [10] GODWILL E A. Free radicals, oxidative stress-related diseases and antioxidant supplementation[J]. Alternative Therapies in Health and Medicine, 2020, 26(6): AT6236.
- [11] SHAHIDI F, AMBIGAIPALAN P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects: A review [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 820-897.
- [12] 余芳. 乳酸菌益生特性及其功能性乳品的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 14-15.
YU Fang. Study on probiotic characteristics of lactic acid bacteria and its functional dairy products[D]. Xian: Shaanxi University of Science and Technology, 2017: 14-15.
- [13] 苏敦, 任发政, 刘松玲, 等. 菌株发酵特性研究及复合酸奶发酵剂的筛选[J]. 中国奶牛, 2017(9): 50-57.
SU Dun, REN Fa-zheng, LIU Song-ling, et al. Study on fermentation characteristics of strains and screening of compound yoghurt starter[J]. China Dairy, 2017(9): 50-57.
- [14] 雷勇刚. 大豆酸奶流变学特性及微观结构的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 21-22.
LEI Yong-gang. Study on rheological properties and microstructure of soybean yogurt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 21-22.
- [15] 童秦怡. 霍山石斛汁功能性酸奶的研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019: 30.
TONG Qin-yi. Study on functional yoghurt with Huoshan dendrobium juice [D]. Wuhu: Anhui University of Technology, 2019: 30.
- [16] 郑金熊, 游丽君. 4 种富锌乳酸菌抗氧化活性及体外消化稳定性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 170-175.
ZHENG Jin-xiong, YOU Li-jun. Antioxidant activity and in vitro digestive stability of four zinc rich lactic acid bacteria[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 170-175.
- [17] 杨淑妮. 全谷物酸牛奶的制备与功能性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 24.
YANG Shu-ni. Study on preparation and function of whole grain yoghurt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 24.
- [18] DAKHILI S, ABDOLALIZADEH L, HOSSEINI M S, et al. Quinoa protein: Composition, structure and functional properties[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125-161.
- [19] ABBADI N H, DAO M C, MEYDANI S N. Yogurt: Role in healthy and active aging[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2014, 99(5): 1 263S-1 270S.
- [20] VOLLMANNOVA A. Cultivar influence on total polyphenol and rutin contents and total antioxidant capacity in buckwheat, amaranth, and quinoa seeds[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2013, 36: 589-595.
- [21] GORINSTEIN S, PAWELZAK E, DELGADO L E, et al. Characterisation of pseudocereal and cereal proteins by protein and amino acid analyses[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(8): 886-891.

(下转第 92 页)

- Mining and Technology, 2016: 14-15.
- [2] 孙鹏. 基于离散元理论的振动筛分过程数值仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012: 20-21.
- SUN Peng. Research on numerical simulation of vibrating screening process based on discrete element theory[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012: 20-21.
- [3] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
- LI Hong-chang, LI Yao-ming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibrating screening based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 117-121.
- [4] 王中营, 任宁, 武文斌, 等. 基于离散元法的往复振动筛筛分效果研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 33-38.
- WANG Zhong-ying, REN Ning, WU Wen-bin, et al. Research on the screening effect of reciprocating vibrating screen based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 33-38.
- [5] 刘瑞, 闫俊霞, 陈国强, 等. 基于离散元法的玉米颗粒振动筛分过程模拟研究[J]. 轻工机械, 2019, 37(3): 31-34, 40.
- LIU Rui, YAN Jun-xia, CHEN Guo-qiang, et al. Simulation study on the vibration screening process of corn particles based on discrete element method[J]. Light Industry Machinery, 2019, 37(3): 31-34, 40.
- [6] 史朋波. ZKB 型直线振动筛的结构动力学分析及优化设计[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018: 18-19.
- SHI Peng-bo. Structural dynamics analysis and optimal design of ZKB linear vibrating screen[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018: 18-19.
- [7] 王晓伟, 张路霞. 基于 ADAMS 的直线振动筛虚拟样机仿真分析[J]. 粮油加工(电子版), 2014(10): 65-67.
- WANG Xiao-wei, ZHANG Lu-xia. Simulation analysis of virtual prototype of linear vibrating screen based on ADAMS[J]. Cereals and Oils Processing (Electronic Edition), 2014(10): 65-67.
- [8] 江海深, 赵跃民, 张博, 等. 基于 DEM 的筛面与物料特性在筛分过程中协同作用的研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(1): 83-87.
- JIANG Hai-shen, ZHAO Yue-min, ZHANG Bo, et al. Research on the synergistic effect of screen surface and material characteristics in the screening process based on DEM[J]. Mining Machinery, 2014, 42(1): 83-87.
- [9] 李小冬, 童昕, 王桂锋. 基于 DEM 的振动参数对颗粒筛分分层与透筛的研究[J]. 矿山机械, 2012, 40(5): 83-89.
- LI Xiao-dong, TONG Xin, WANG Gui-feng. Research on particle sieving stratification and penetration based on vibration parameters of DEM[J]. Mining Machinery, 2012, 40(5): 83-89.
- [10] 沈国浪, 李占福, 童昕, 等. 基于 DEM 的振动筛振动参数对分层质量的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 217-222.
- SHEN Guo-lang, LI Zhan-fu, TONG Xin, et al. Influence of vibration parameters of vibrating screen based on DEM on stratification quality[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 217-222.
- [11] 沈国浪, 童昕, 李占福. 基于离散单元法对振动筛仿真实验次数分析[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(2): 110-112, 116.
- SHEN Guo-lang, TONG Xin, LI Zhan-fu. Analysis of the number of vibration screen simulation experiments based on discrete element method[J]. Mechanical Design and Research, 2019, 35(2): 110-112, 116.
- [12] 刘义伦, 苏家辉, 赵先琼, 等. 基于离散元法的振动筛的筛分效率研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2018, 50(4): 78-83.
- LIU Yi-lun, SU Jia-hui, ZHAO Xian-qiong, et al. Research on the screening efficiency of vibrating screen based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 78-83.
- [13] 夏欢. 直线振动筛的工作原理与运动学参数选择[J]. 机械工程与自动化, 2012(6): 164-165.
- XIA Huan. The working principle and kinematic parameter selection of linear vibrating screen[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2012(6): 164-165.

(上接第 22 页)

- [22] PEREIRA E, ENCINZ C, BARROS L, et al. Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food[J]. Food Chemistry, 2019, 280: 110-114.
- [23] 王静, 刘丁丽, 罗丹, 等. 体外模拟消化对藜麦抗氧化活性、 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性影响研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 51-58.
- WANG Jing, LIU Ding-li, LUO Dan, et al. Effects of simulated digestion in vitro on the antioxidant, α -Glucosidase and α -amylase inhibition activities of quinoa[J]. Journal of China Grain and Oil, 2021, 36(4): 51-58.
- [24] VILLA R J A, PALAFOXET C H, YAHIA E M, et al. Maintaining antioxidant potential of fresh fruits and vegetables after harvest[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(6): 806-822.
- [25] 刘月瑶. 不同加工方式对藜麦营养品质及抗氧化性能影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- LIU Yue-yao. Effects of different processing methods on nutritional quality and antioxidant activity of quinoa [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.
- [26] HERNANDEZ L B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) as source of bioactive compounds[J]. Bioactive Compounds in Health Diseases, 2019, 2(5): 556-560.
- [27] 张文刚, 张杰, 党斌, 等. 藜麦黄酒发酵工艺优化及抗氧化特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 174-178, 226.
- ZHANG Wen-gang, ZHANG Jie, DANG Bin, et al. Optimization of fermentation process and antioxidant properties of quinoa yellow rice wine [J]. Food & Machinery, 2019, 35(12): 174-178, 226.