

发芽糙米米糠营养成分和 γ -氨基丁酸分析及缓解体力疲劳功效

王嘉怡^{1,2}, 潘姝璇^{2,3}, 夏 陈², 邓海云^{1,2}, 吕晓华^{1,*}, 陈 建^{2,*}

(1.四川大学华西公共卫生学院, 四川 成都 610041; 2.四川省农业科学院农产品加工研究所, 四川 成都 610066;

3.四川农业大学食品学院, 四川 雅安 625014)

摘 要: 目的: 测定发芽糙米米糠(germinated brown rice bran, GBRB)中营养成分及重金属的含量, 建立高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)法测定GBRB中 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA), 并研究GBRB的抗疲劳功效。方法: 1) 采用邻苯二甲酰柱前衍生、HPLC法测定GBRB中GABA的含量; 2) 50只SD大鼠按体重随机分为5组, 即空白对照组、高脂对照组和GBRB质量分数分别为30%、20%、10%的高、中、低3个剂量组。喂饲83 d, 进行负重游泳实验, 记录游泳力竭时间。结果: 1) GBRB的粗纤维、灰分质量分数分别不到普通米糠的29%、33%, 粗蛋白、总氨基酸及单一氨基酸(除胱氨酸)、粗脂肪与普通米糠中的含量相近, 无机元素含量都低于普通米糠, 重金属含量在GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》安全食用限量以下; 2) 用实验建立的HPLC条件检测GABA, 在68.7~275.0 $\mu\text{g/mL}$ 范围内线性关系良好, R^2 为0.999 9, 测出的GABA含量为53 mg/100 g, 平均回收率为99.61%; 3) 与空白对照组相比, GBRB高剂量组大鼠游泳力竭时间显著延长($P < 0.05$)。结论: GBRB的营养成分含量较发芽前有所变化, GABA含量增加, 食用高剂量GBRB有利于延长大鼠负重游泳力竭时间, 说明GBRB具有缓解体力疲劳的功效。

关键词: 发芽糙米米糠; 营养成分; γ -氨基丁酸; 高效液相色谱; 抗体力疲劳

Nutritional Composition, Gamma-Aminobutyric Acid Content and Anti-fatigue Activity of Germinated Brown Rice Bran

WANG Jiayi^{1,2}, PAN Shuxuan^{2,3}, XIA Chen², DENG Haiyun^{1,2}, LÜ Xiaohua^{1,*}, CHEN Jian^{2,*}

(1. West China School of Public Health, Sichuan University, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;

3. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Objective: To determine the contents of nutrients and heavy metals in germinated brown rice bran (GBRB) and establish a high performance liquid chromatography (HPLC) method to detect gamma-aminobutyric acid (GABA) in GBRB, as well as to evaluate the anti-fatigue activity of GBRB. Methods: The content of GABA was determined by HPLC with pre-column *o*-phthalaldehyde derivatization. Fifty male SD rats were randomly divided into five groups: control, high-fat diet and low-dose (10%), medium-dose (20%), high-dose (30%) GBRB groups. After feeding for 83 days, the rats were forced to swim until exhausted, and the weight-loaded swimming time was recorded. Results: The crude fiber and ash contents in GBRB were nearly 29% of those in ungerminated brown rice bran, although both had similar contents of crude protein, total amino acids and individual amino acids (except for cystine). In addition, the contents of all investigated inorganic elements were lower in GBRB, and the contents of all heavy metals were below the safe limits set in the national standard (GB 2762—2012). Our HPLC method presented good linearity over the concentration range of 68.7–275.0 $\mu\text{g/mL}$ with correlation coefficient (R^2) of 0.999 9. The GABA content in GBRB was determined to be 53 mg/100 g. The average recovery of this method was 99.61%. Compared with the control group, high-dose GBRB significantly prolonged the exhaustive swimming time ($P < 0.05$). Conclusion: The contents of nutrients in brown rice bran change and the GABA

收稿日期: 2017-07-11

基金项目: 四川省财政创新能力提升工程项目(2016TSCY-012); 四川省农业科学院条件建设专项-院人才项目

第一作者简介: 王嘉怡(1993—)(ORCID: 0000-0001-9612-3408), 女, 硕士研究生, 研究方向为营养与食品卫生学。

E-mail: 463106470@qq.com

*通信作者简介: 吕晓华(1971—)(ORCID: 0000-0002-4342-3949), 女, 教授, 博士, 研究方向为营养与食品卫生学。

E-mail: 498842733@qq.com

陈建(1969—)(ORCID: 0000-0001-8951-1533), 男, 研究员, 博士, 研究方向为功能食品。

E-mail: jc_saas@yahoo.com

content increases after germination. High-dose consumption of GBRB helps prolong the exhaustive swimming time of rats, indicating the anti-fatigue activity of GBRB.

Keywords: germinated brown rice bran; nutritional composition; gamma-aminobutyric acid; high performance liquid chromatography; anti-fatigue

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20170711-165

中图分类号: TS213.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 01-0177-06

引文格式:

王嘉怡, 潘姝璇, 夏陈, 等. 发芽糙米米糠营养成分和 γ -氨基丁酸分析及缓解体力疲劳功效[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 177-182. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20170711-165. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Jiayi, PAN Shuxuan, XIA Chen, et al. Nutritional composition, gamma-aminobutyric acid content and anti-fatigue activity of germinated brown rice bran[J]. Food Science, 2019, 40(1): 177-182. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20170711-165. <http://www.spkx.net.cn>

发芽糙米是糙米在合适的温度、湿度及营养素条件下发生种子萌发后经加工干燥得到的活性糙米。糙米发芽的生理过程激活和释放了其中纤维素酶、蛋白酶、淀粉酶、植酸酶等各种生物酶^[1], 进而催化淀粉、蛋白质、纤维素、维生素等营养成分以及 γ -氨基丁酸(gamma-aminobutyric acid, GABA)等功能活性物质的代谢转化或积聚^[2]。因而相较于糙米, 发芽糙米的健康功能得到提高, 食用的口感和风味也得以改善。糙米除去胚乳(白米部分, 主要含淀粉), 即得米糠。米糠包含了糙米主要的功能活性物质及部分营养成分^[3], 是具有调节血压、缓解心率^[4]、降血糖和血脂^[5-9]、保护神经^[10]、改善肠代谢、抗肿瘤^[11]等健康作用的食药同源物质。

发芽糙米去除胚乳部分就得到发芽糙米米糠(germinated brown rice bran, GBRB)。由于经历了糙米的生理活化过程, GBRB中的活性物质及营养成分也会有特点。此前鲜见对GBRB的相关研究。本实验测定了GBRB中营养成分、重金属和功能活性物质GABA的含量, 探究了其抗疲劳功效, 为发芽糙米的精深加工及功能食品开发提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 动物、材料与试剂

实验动物为SD大鼠(SPF级), 购于成都达硕生物科技有限公司, 许可证号: SCXK(川)2015-030, 体质量为(280±20)g, 共60只; 基础饲料购于成都达硕生物科技有限公司。

发芽糙米由东北某产糙谷物公司制备。GABA标准品(纯度>98%) 美国Sigma公司; 甲醇、乙腈、乙醇(色谱纯) 北京Mreda公司; 乙酸钠、异丙醇成都市科龙化工试剂厂。

1.2 仪器与设备

1260 Infinity高效液相色谱(high performance liquid

chromatography, HPLC)仪(配置G1311B四元梯度泵、G1329B自动进样仪、G1316A柱温箱、G13150紫外检测器) 美国Agilent公司; AA-240FS火焰原子吸收分光光度计 美国Varian公司; K9840凯氏定氮仪 山东海能科技有限公司; 835-50型氨基酸自动分析仪 日本日立公司。

1.3 方法

1.3.1 GBRB的制备

采用常用碾米机, 用一般糙米碾磨制白米的工艺, 将100 kg发芽糙米碾米去除胚乳部分(白米), 剩余物即为GBRB。

1.3.2 GBRB营养成分、无机元素及重金属含量的测定

水分质量分数测定参照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》; 灰分质量分数测定参照GB/T 6438—2007《饲料中粗灰分的测定》; 粗脂肪质量分数测定参照GB/T 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》; 粗蛋白质质量分数测定参照GB 5009.5—2010《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》; 粗纤维质量分数测定参照GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》; 淀粉质量分数测定参照GB/T 5006—1985《谷物籽粒粗淀粉测定法》; 氨基酸质量分数测定参照GB/T 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》; 钾、钠含量测定参照GB/T 5009.91—2017《食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定》; 总磷含量测定参照GB/T 5009.87—2003《食品中磷的测定》; 硒含量测定参照GB/T 5009.93—2010《食品安全国家标准 食品中硒的测定》; 铁、钙、铜、锌、镁、锰含量测定分别参照GB 5009.90—2016《食品安全国家标准 食品中铁的测定》、GB 5009.92—2016《食品安全国家标准 食品中钙的测定》、GB 5009.13—2017《食品安全国家标准 食品中铜的测定》、GB 5009.14—2017《食品安全国家标准 食品中锌的测定》、GB 5009.241—2017《食品安全国家标准 食品中镁的测定》、GB 5009.242—2017《食品安全国家标准 食品中锰的测定》; 铅含量测定参照

GB 5009.12—2010《食品安全国家标准 食品中铅的测定》；镉含量测定参照GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》；总汞含量测定参照GB/T 5009.17—2014《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》；总砷含量测定参照GB/T 5009.11—2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》。

1.3.3 GBRB中GABA含量的HPLC法测定

准确称取GABA标准品10.3 mg于25 mL容量瓶中，以超纯水溶解并定容，用超纯水稀释为梯度浓度的标准曲线工作液。准确称取GBRB 5.00 g，以体积分数60%乙醇溶液为提取液，液料比为5:1，60℃超声波辅助提取1 h后离心，上清液为GABA样品溶液。

衍生化试剂为20 mg邻苯二甲醛、1 mL甲醇、100 μ L β -巯基乙醇、4 mL (pH 9.5) 硼酸缓冲液，溶解即得。样品衍生化：取样品溶液300 μ L、衍生化试剂150 μ L，反应4.5 min后加入300 μ L磷酸二氢钠溶液(0.1 mol/L)终止反应，反应液以0.22 μ m滤膜过滤后用于测定。

色谱条件：色谱柱为IORBAX Eclipse XDB-C₁₈ Analytica (250 mm×4.6 mm, 5 μ m)；流动相A为乙酸钠溶液(25 mmol/L)，B为乙腈；并从0 min(流动相A、B体积比为90:10)至15 min(流动相A、B体积比为65:35)梯度洗脱；流速为1.1 mL/min；紫外检测波长为332 nm；柱温为40℃；进样量为10 μ L。

1.3.4 动物实验

整个动物实验过程中，动物饲养于SPF级动物房。将50只大鼠按体重随机均分成5组，即空白对照组、高脂对照组和GBRB低、中、高剂量组，每组10只。空白对照组动物喂饲基础饲料，高脂对照组喂饲高脂饲料，3个实验组动物分别喂饲对应低、中、高剂量GBRB饲料(动物饲料配方见表1)。控制各组动物进食量及饮水量基本一致，持续83 d。每周记录进食量和体质量。

表1 动物饲料配方
Table 1 Formulation of experimental diets

类别	基础饲料 质量分数	猪油 质量分数	白糖 质量分数	蛋黄粉 质量分数	熟大豆粉 质量分数	GBRB 质量分数
基础饲料	100	—	—	—	—	—
高脂饲料	71.3	6.3	4.7	4.7	12.9	—
低剂量饲料	61.3	6.3	4.7	4.7	12.9	10.0
中剂量饲料	51.3	6.3	4.7	4.7	12.9	20.0
高剂量饲料	42.6	6.3	4.7	4.7	12.9	30.0

注：—，不含该成分，下同。

喂饲实验第83天，将大鼠禁食16 h，称量大鼠体质量，并按其体质量的5%在颈部以铅皮负重。将大鼠置于直径1 m、水深0.5 m、水温25℃的水槽中，记录大鼠从游泳开始至力竭沉入水中5 s无力浮出水面的时间，作为

游泳力竭时间。

1.4 数据统计分析

实验数据用SPSS 19.0统计软件进行分析，均以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用单因素方差分析比较各组之间是否有总体差异，统计值为 F 。按方差分析的程序，先进行方差齐性检验，若方差齐，计算 F 值；组间两两比较采用Dunnett- t 检验，统计值为 t_D 。

2 结果与分析

2.1 GBRB得率分析

发芽糙米经碾磨去除胚乳部分(即白米部分，主要是淀粉)，得到GBRB 33.6 kg，出糠率为33.6%。由于碾米时发芽糙米米粒易碎，因此得到的GBRB中混入了部分不易筛出的碎米粉，导致出糠率比普通糙米的(约5.4%~9.0%^[12-13])要高。

2.2 GBRB中营养成分、无机元素及重金属的含量分析

2.2.1 GBRB中的营养成分含量分析

表2 GBRB营养成分质量分数
Table 2 Nutrient contents in GBRB

项目	水分质量 分数/%	灰分质量 分数/%	粗蛋白质量 分数/%	粗脂肪质量 分数/%	粗纤维质量 分数/%	淀粉质量 分数/%
GBRB	10.9	3.2	11.0	8.5	2.9	53.6
普通米糠 ^[14-16,20]	8.06	9.6~10.2	3.2~10.6	2.8~16.4	9.9~10	—

如表2所示，GBRB的粗蛋白质量分数为11.0%，相较于文献[14-16,20]报道的普通米糠中粗蛋白质量分数范围3.2%~10.6%，GBRB的蛋白质量分数高于此范围的最大值。GBRB的粗脂肪含量为8.45%，在文献[14-16]报道的普通米糠的粗脂肪质量分数范围(14.5%~16.4%)之间。GBRB中粗纤维质量分数(2.9%)不到普通米糠(9.9%~10%)^[14-15]的29%，这可能是糙米在发芽过程中，相关纤维素酶的作用致使粗纤维断裂成可溶性小碎片或小分子质量的多糖，因此可测定的粗纤维质量分数偏低。而且GBRB中灰分质量分数(3.2%)不到普通米糠中的灰分质量分数(9.6%~10.2%)^[14-16]的33%，这很可能是因为发芽过程激活了植酸酶，其中菲汀(植酸钙镁，又称肌醇六磷酸钙镁)被酶解解释放出肌醇、大量磷酸钙盐及少量镁盐，这些无机盐可溶于发芽浸泡水流失，因而检测发现GBRB经燃烧后剩余的无机灰分质量分数减少很多。这些数据也表明，糙米经发芽过程确实激活了有关的酶，酶再作用于相关底物致其活化、分解，或产生新的活性物质，进而使发芽糙米有更好的功能活性。另外，测定的GBRB中淀粉质量分数为53.6%，主要由于发芽糙米碾米时易碎，GBRB中很容易混入碎米细粉，因此测得的淀粉质量分数较高。

2.2.2 GBRB中的氨基酸含量分析

GBRB氨基酸分析如表3所示。总氨基酸质量分数

10.2%，略低于文献[21-22]报道的普通米糠中总氨基酸11.76%~11.80%的范围，这与粗蛋白的含量情况一致（表2），主要因为氨基酸分析多源于蛋白质的水解。在所测定的17种单一氨基酸中，天冬氨酸（0.98%）、谷氨酸（1.60%）、赖氨酸（0.46%）的含量略高于普通米糠相应氨基酸的含量^[11]（分别为0.85%、1.08%、0.37%）。其余的13种氨基酸在文献报道的普通米糠中对氨基酸含量范围内或略低。GBRB中的胱氨酸（0.14%）在普通米糠中鲜有发现。同时GBRB也含有必需氨基酸：异亮氨酸（0.42%）、赖氨酸（0.45%）、组氨酸（0.33%）。

表3 GBRB中氨基酸质量分数
Table 3 Amino acid contents in GBRB

项目	总氨基酸 质量分数	天门冬氨酸 质量分数	苏氨酸 质量分数	丝氨酸 质量分数	谷氨酸 质量分数	甘氨酸 质量分数	丙氨酸 质量分数	胱氨酸 质量分数	缬氨酸 质量分数
GBRB	10.2	0.98	0.41	0.53	1.6	0.55	0.71	0.14	0.62
普通米糠 ^[16-18]	11.76~11.80	0.85	0.6~1.06	0.65~0.66	1.08	0.91~0.96	1.23~1.37	-	0.90~0.95

项目	蛋氨酸 质量分数	异亮氨酸 质量分数	亮氨酸 质量分数	酪氨酸 质量分数	苯丙氨酸 质量分数	赖氨酸 质量分数	组氨酸 质量分数	精氨酸 质量分数	脯氨酸 质量分数
GBRB	0.12	0.42	0.86	0.34	0.56	0.46	0.33	0.94	0.56
普通米糠 ^[16-18]	0.18~0.44	0.65~1.86	1.25~1.95	0.18~0.65	0.65~0.83	0.37	0.31	0.27~1.13	0.45~0.62

2.2.3 GBRB中无机元素含量分析

GBRB中钾、钠、铁、锌、锰、钙、镁、硒、磷、铜10种无机元素含量见表4，这些元素含量都低于文献[15,20]报道的普通米糠中相应元素含量，这可能因为有关无机盐在糙米浸泡发芽过程中溶解于水而流失，也可能跟稻谷品种及种植条件有关。

表4 GBRB中无机元素含量
Table 4 Mineral contents in GBRB

项目	钾含量	钠含量	铁含量	锌含量	锰含量	钙含量	镁含量	硒含量	总磷含量	铜含量
GBRB	750.0	54.0	33.5	18.6	34.3	373.0	1700.0	0.04	3500.0	2.12
普通米糠 ^[15,20]	42000.0	1020.0	70.0	84.0	440.0	1000.0	13800.0	-	15100.0	20.0

2.2.4 GBRB中重金属含量分析

表5 GBRB中重金属含量
Table 5 Heavy metal contents in GBRB

项目	测定值	国家限量标准
总汞含量	0.003 4	0.02
总砷含量	0.32	0.5
铅含量	0.18	0.2
镉含量	0.022	0.1

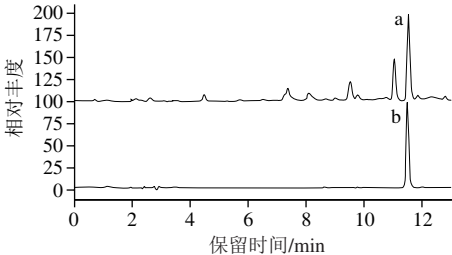
测定了GBRB中汞（0.003 4 mg/kg）、砷（0.32 mg/kg）、铅（0.18 mg/kg）、镉（0.022 mg/kg）4种重金属含量，结果如表5所示。参考GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》，本实验的

GBRB中重金属含量完全在安全食用限量范围内，汞甚至比限量标准（0.02 mg/kg）低83%，镉比限量标准（0.1 mg/kg）低78%，表明GBRB安全可食。有报道普通米糠常因重金属含量超标而不适合食用^[23]，因此稻谷品种、种植地、种植方法及发芽制备和后处理过程是制备能安全食用GBRB的重要控制因素。

2.3 GABA的HPLC分析

2.3.1 HPLC分析条件

本实验探索的HPLC方法的化学衍生、流动相、洗脱梯度等条件与文献[24]报道的都不同。应用本法对GBRB中的GABA进行测定，HPLC图谱如图1所示。GABA标准品及GBRB样品中GABA的出峰时间都是11.4 min左右，比文献[24-25]报道的HPLC法测试GBAB的出峰时间（18 min）早，并且在此条件下，GABA得到较好分离，峰形尖锐。



a. GBRB样品；b. GABA标准品。

图1 GBRB样品及GABA标准品的HPLC图

Fig. 1 HPLC chromatograms for GBRB and GABA standard

2.3.2 标准曲线和线性关系

将1.3.3节中配制好的标准曲线工作液进行HPLC分析，以质量浓度为横坐标，峰面积（y）为纵坐标，得到标准曲线 $y = 8\,961.6x - 140.7$ （ $R^2 = 0.999\,9$ ， $n = 6$ ），证明线性关系良好。

2.3.3 精密度分析

将样品按1.3.2节制备样品溶液，共4份，每份测定6次，相对标准偏差（relative standard deviation, RSD）分别为1.07%、1.25%、1.85%、1.52%，表明该方法精密度良好。

2.3.4 加标回收率分析

表6 GABA加标回收率
Table 6 Recoveries of GABA from spiked samples

样品溶液质量浓度/ ($\mu\text{g/mL}$)	加样量/ μg	测得量/ μg	回收率/%	平均 回收率/%
104.60	41.20	147.20	100.98	99.61
	61.80	161.10	96.83	
104.40	28.84	133.07	99.93	
	16.48	120.25	99.49	
104.10	28.84	133.61	100.51	99.89
	16.48	120.50	99.89	

向已知浓度样品中分别加入GABA标准品,按1.3.3节制备样品溶液,进行HPLC分析,结果见表6。平均加标回收率为99.61%,RSD为1.46% ($n=6$)。该方法具有良好的回收率,结果可靠性高。

2.3.5 GABA含量及重复性分析

将样品按1.3.2节制备样品溶液,共4份,测定每份样品含量,平均含量为53 mg/100 g,其RSD为1.90%,重复性良好。发芽糙米的特点之一是其中GABA含量增加^[26]。本研究的起始原料源于工厂生产制备的发芽糙米,而非实验室小量制备,因此与参考文献[25,27]报道的小量制备的发芽糙米中GABA含量(分别为22.68~88.36、12.77~24.89 mg/100 g)相比较,本实验测定的GBRB中GABA含量较高,且有一定代表性。

2.4 动物实验分析

2.4.1 大鼠的体质量变化分析

各组实验大鼠的初体质量、终体质量及增体质量如表7所示。实验过程中,大鼠的活动状态及摄食饮水能力均正常。各组大鼠体质量的增加相对空白对照组都没有统计学意义的差异($P>0.05$)。说明食用GBRB对大鼠的正常生长发育无不良影响。

表7 实验大鼠的体质量变化 ($n=10$)
Table 7 Variation in body mass of rats from all groups ($n=10$)

组别	初体质量/g	终体质量/g	增体质量/g
空白对照组	292.1±13.2	481.3±40.2	245.3±30.9
高脂对照组	288.7±4.4	430.7±63.6	242.0±53.5
低剂量组	297.4±11.5	514.6±59.1	270.3±59.1
中剂量组	293.6±13.3	482.7±50.5	266.2±17.2
高剂量组	287.1±11.0	496.8±49.4	261.5±17.2

2.4.2 GBRB的抗疲劳作用分析

抗疲劳功效常用动物的负重游泳实验来评价^[27],因为运动耐力的提高是抗疲劳能力加强最直接的表现,游泳时间的长短可以反映动物运动疲劳的程度。本研究采用大鼠的负重游泳实验的游泳力竭时间来评价GBRB的抗疲劳功效。大鼠经高、中、低剂量GBRB灌胃后,测试其负重游泳力竭的时间,并与空白及高脂组进行对照(表8)。与空白对照组相比,高剂量组大鼠的游泳时间显著延长($P<0.05$),中、低剂量组没有显著差异,说明大鼠食用含质量分数30% GBRB的饲料后,其运动耐力显著提高。这个结果提示在常规饲料中加入适当比例的GBRB,有利于体质的综合健康,进而增强抗疲劳的能力。高脂对照组大鼠的游泳时间则显著短于空白对照组($P<0.05$),说明食用含高脂的饲料有损运动能力。而高、中、低剂量3组大鼠游泳时间都显著长于高脂组大鼠($P<0.05$),说明食用GBRB可以缓解或弥补大鼠食用高脂饲料导致的运动能力下降。

表8 GBRB抗疲劳的效果 ($n=10$)

Table 8 Anti-fatigue activity of GBRB ($n=10$)

组别	空白对照组	高脂对照组	低剂量组	中剂量组	高剂量组
游泳力竭时间/s	341.90±114.22	194.90±133.71 [#]	374.90±134.03 [*]	340.50±78.49 [*]	466.10±174.08 [*]

注: #.与空白对照组比较差异显著($P<0.05$); *.与高脂对照组比较差异显著($P<0.05$)。

实验大鼠喂食GBRB后负重游泳时间明显延长,提示食用GBRB能够增强运动能力,缓解疲劳。GBRB体现出缓解疲劳功效,与其包含的营养成分相关,也与其功能活性物质相关,特别是本研究测得GABA含量达53 mg/100 g。GABA能促进小鼠生长激素(growth hormone, GH)的分泌,增加小鼠肝糖原的储存。糖原是维持运动的主要能源物质, GH能增加葡萄糖异生作用,减少糖的消耗,增加糖原储备^[28]。因而GABA能提高运动能力,具有一定的抗疲劳作用^[29]。另外, GBRB中的谷胱甘肽^[30]、二十八烷醇^[31-32]、阿片样肽^[33-34]等具有抗疲劳作用的活性物质也可能与GABA产生协同作用,促进了GBRB缓解大鼠的运动疲劳。

3 结 论

本实验对源于工业规模GBRB的营养成分、无机元素及重金属含量进行了检测分析。结果表明GBRB的粗纤维、灰分质量分数分别不到普通米糠的29%、33%,这应当正是经发芽过程和经纤维素酶、植酸酶等酶促作用的结果。GBRB中粗蛋白、总氨基酸及单一氨基酸(除胱氨酸)、粗脂肪与普通米糠中的含量相近。经过浸泡发芽并溶水流失, GBRB中无机元素含量都低于普通米糠。重金属含量在我国安全食用限量以下。建立并验证了测定GBRB中GABA含量的HPLC方法, GABA出峰时间仅约11 min。测得发芽糙米的米糠中GABA含量达到53 mg/100 g。用含有高剂量(30%) GBRB的高脂饲料喂饲大鼠后,大鼠负重游泳至竭力时间显著长于空白对照;喂食高(30%)、中(20%)、低(10%)剂量的GBRB还能够提高大鼠因食用高脂饲料导致的运动能力下降;结果表明食用GBRB具有抗疲劳功效。

当今社会由于生活水平提高,人们饮食中普遍摄入较多高脂肪食物,导致体脂过高或肥胖、心血管不良症状等,进而体现运动能力下降或虚弱。GBRB具有抗疲劳功效,特别是能够抑制高脂饮食导致的运动能力下降,提示GBRB可被研发成为新的功能食品。

参考文献:

- [1] 郑艺梅. 发芽糙米营养特性、 γ -氨基丁酸富集及生理功效的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006: 31-33. DOI:10.7666/d.Y1198703.
- [2] CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds[J]. Food Chemistry, 2016, 196(8): 259-271. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.09.025.

- [3] 曹蕊. 米糠营养成分分析及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 1-3. DOI:10.7666/d.y1398850.
- [4] KHWANCHAI P, CHINPRAHA S, PICHYANGKURA R, et al. Gamma-aminobutyric acid and glutamic acid contents, and the GAD activity in germinated brown rice (*Oryza sativa* L.): effect of rice cultivars[J]. Food Science & Biotechnology, 2014, 23(2): 373-379. DOI:10.1007/s10068-014-0052-1.
- [5] LIU Y W, ZUO P Y, ZHA X N, et al. Octacosanol enhances the proliferation and migration of human umbilical vein endothelial cells via activation of the PI3K/Akt and MAPK/Erk pathways[J]. Lipids, 2015, 50(3): 241-251. DOI:10.1007/s11745-015-3991-2.
- [6] USUKI S, ITO Y, MORIKAWA K, et al. Effect of pre-germinated brown rice intake on diabetic neuropathy in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Nutrition & Metabolism, 2007, 4(1): 1-11. DOI:10.1186/1743-7075-4-25.
- [7] 袁列江, 付湘晋, 李忠海, 等. 发芽糙米膳食纤维制备及其降血脂活性研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(5): 51-53. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2016.05.015.
- [8] 诸芸, 刘星华, 周伟杰, 等. 发芽糙米对社区血脂异常人群的干预效果评价[J]. 现代预防医学, 2014, 41(13): 2378-2380.
- [9] KAWANA H, IHARA M, SATO M, et al. Effect on lipid and fatty acid composition in serum of female university students dieting pre-germinated brown rice[J]. Bulletin of Tokyo Kasei University Natural Science, 2003, 23(4): 23-25.
- [10] CHOMPOOPONG S, JARUNGTITAREE S, PUNBANLAEM T, et al. Neuroprotective effects of germinated brown rice in rotenone induced Parkinson's-like disease rats[J]. Neuromolecular Medicine, 2016, 18(3): 1-13. DOI:10.1007/s12017-016-8427-5.
- [11] 赵国平, 戴慎, 陈仁寿, 等. 中药大辞典[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006: 1342-1343.
- [12] 王继强, 张波, 张宝彤, 等. 稻谷加工副产品的营养特点及在养殖业上的应用[J]. 广东饲料, 2014, 23(6): 38-40.
- [13] 俞兰琴, 黄小平. 碾米工业副产品的综合利用[J]. 粮食与饲料工业, 2011, 2011(5): 54-58. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.2011.05.014.
- [14] 田科雄, 高凤仙, 贺建华, 等. 米糠常规营养成分表观消化率及氨基酸回肠末端消化率的测定[J]. 饲料工业, 2003, 24(5): 16-17.
- [15] 张叶秋, 郝帅帅, 高硕, 等. 米糠高纤维日粮对苏淮猪生长性能及肠道功能的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 807-813. DOI:10.7685/j.nau.201601011.
- [16] 刘昆仑, 李央, 陈复生. 糙米、白米和米糠营养成分分析与评价[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 7-12. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2016.03.002.
- [17] 徐杰. 发芽糙米淀粉和蛋白的研究及方便米饭的制备[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 13.
- [18] 吴凤凤. 发芽对糙米主要营养成分-生理功效和加工特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 10-11.
- [19] 郑艺梅, 李群, 华平, 等. 发芽糙米蛋白质营养价值评价[J]. 食品科学, 2006, 27(10): 549-551. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2006.10.140.
- [20] 邱伟芬. 米糠的功能作用和营养特性[J]. 南京财经大学学报, 1996(2): 72-75.
- [21] 文伟, 刘磊, 张名位, 等. 脱脂米糠复合酶解工艺条件优化及其营养特性评价[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1597-1608. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.14.
- [22] 尹孝超, 钱海峰, 王立, 等. 米糠固态发酵工艺优化及其氨基酸变化[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 42-46. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2017.03.009.
- [23] 刘道银. 中国食品中重金属危害现状与检测技术研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(19): 194-198.
- [24] 张志清, 徐杰, 丛军, 等. 高效液相色谱法测定发芽麦粒中 γ -氨基丁酸(GABA)含量[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 135-139.
- [25] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201412019.
- [26] 吴晓娟, 从竞远, 吴伟, 等. 糙米发芽前后营养成分的变化及其对发芽糙米糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 67-72. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718011.
- [27] 李勇, 刘建伟, 袁娇, 等. HPLC柱前衍生法测定发芽糙米中 γ -氨基丁酸的含量[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 119-121. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2014.04.031.
- [28] 刘静波, 林松毅. 以负重游泳动物试验评价抗疲劳作用的影响因素分析[J]. 食品科学, 2005, 26(8): 399-403. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2005.08.105.
- [29] MØLLER N, JØRGENSEN J O, ABILDGÅRD N, et al. Effect of growth hormone on glucose metabolism[J]. Hormone Research in Paediatrics, 1991, 36(Suppl 1): 32.
- [30] 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: 89-92.
- [31] 孟春玲, 孟庆虹, 张守文, 等. 发芽糙米的营养功能和进一步开发应用[J]. 中国食品添加剂, 2014(5): 156-160. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2014.05.017.
- [32] 陈芳. 米糠中二十八烷醇的提取精制及其抗疲劳功能的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 75-81. DOI:10.7666/d.y1129853.
- [33] KIM H, PARK S, HAN D S, et al. Octacosanol supplementation increases running endurance time and improves biochemical parameters after exhaustion in trained rats[J]. Journal of Medicinal Food, 2003, 6(4): 345-351. DOI:10.1089/109662003772519903.
- [34] 张建辉. 阿片肽的制备纯化及其测定方法的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2007: 1-15.
- [35] 曹晓虹. 发芽糙米中类阿片活性肽腹肌机理与功能特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 124-127.