

不同品种青稞固态发酵制备青稞红曲活性成分的差异分析

李 芳¹, 李斐然¹, 黄卫锋², 张 萌¹, 杨文娟¹, 叶雨婷¹, 张梦实¹, 吴大强^{3,*}

(1.亳州学院中药学院, 安徽 亳州 236800; 2.安徽德昌药业股份有限公司, 安徽 亳州 236800;

3.安徽中医药大学中西医结合学院, 安徽 合肥 230012)

摘 要: 以不同品种青稞(黑青稞、蓝青稞、白青稞)为发酵基质, 经紫色红曲霉(*Monascus purpureus*)固态发酵制备青稞红曲, 采用高效液相色谱法测定并分析青稞红曲中 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)、8种核苷成分(尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷、腺苷)及花青素含量, 比较不同青稞红曲中活性成分含量差异。结果表明, 黑青稞红曲中的GABA含量($(116.13 \pm 3.76) \mu\text{g/g}$)显著高于蓝青稞红曲($(68.85 \pm 3.68) \mu\text{g/g}$)及白青稞红曲($(51.17 \pm 1.89) \mu\text{g/g}$) ($P < 0.0001$)。8种核苷类成分含量在不同青稞红曲间存在显著差异($P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 、 $P < 0.0001$), 且黑青稞红曲在多种核苷成分上表现出富集优势。白青稞红曲中未检出花青素, 黑青稞红曲中花青素含量($(81.05 \pm 5.51) \mu\text{g/g}$)显著高于蓝青稞红曲($(61.82 \pm 4.81) \mu\text{g/g}$) ($P < 0.01$)。综上, 黑青稞是制备富含GABA、核苷类成分及花青素的高品质红曲的优质原料, 可为青稞红曲的原料品种优选提供参考依据。

关键词: 紫色红曲霉; 青稞红曲; γ -氨基丁酸; 核苷; 花青素

Differential Analysis of Active Components in Highland Barley *Monascus* Prepared by Solid-State Fermentation with Different Highland Barley Varieties

LI Fang¹, LI Feiran¹, HUANG Weifeng², ZHANG Meng¹, YANG Wenjuan¹, YE Yuting¹, ZHANG Mengshi¹, WU Daqiang^{3,*}

(1. College of Traditional Chinese Medicine, Bozhou University, Bozhou 236800, China;

2. Anhui Dechang Pharmaceutical Co. Ltd., Bozhou 236800, China;

3. College of Integrated Traditional and Western Medicine, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China)

Abstract: Using different varieties of highland barley (black, blue, and white highland barley) as fermentation substrate, highland barley *Monascus* was prepared via solid-state fermentation with *Monascus purpureus*. The contents of γ -aminobutyric acid (GABA), eight nucleoside components (uracil, cytidine, hypoxanthine, adenine, inosine, guanosine, thymidine, and adenosine), and anthocyanins in the highland barley *Monascus* were determined and analyzed using high performance liquid chromatography. The differences in active ingredient contents among different highland barley *Monascus* samples were compared. The results showed that the GABA content in black highland barley *Monascus* ($(116.13 \pm 3.76) \mu\text{g/g}$) was significantly higher than that in blue ($(68.85 \pm 3.68) \mu\text{g/g}$) and white highland barley *Monascus* ($(51.17 \pm 1.89) \mu\text{g/g}$) ($P < 0.0001$). The contents of the eight nucleoside components also exhibited significant differences among the different highland barley *Monascus* samples ($P < 0.01$, $P < 0.001$, $P < 0.0001$), with black highland barley *Monascus* showing enrichment advantages in multiple nucleoside components. No anthocyanins were detected in white highland barley *Monascus*, while the anthocyanin content in black highland barley *Monascus* ($(81.05 \pm 5.51) \mu\text{g/g}$) was significantly higher

收稿日期: 2025-11-18

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(2023AH052278; 2023AH050727; 2024AH050921);

亳州学院科研启动项目(BYKQ202525); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202512926064);

国家级大学生创新训练计划项目(202512926015)

第一作者简介: 李芳(1988—)(ORCID: 0009-0001-6376-5866), 女, 副主任药师, 硕士, 研究方向为中药与食品质量。

E-mail: lfahuang@163.com

*通信作者简介: 吴大强(1984—)(ORCID: 0009-0001-8799-6060), 男, 教授, 博士, 研究方向为中药及其有效成分抗菌机制。E-mail: daqw@126.com

than that in blue highland barley *Monascus* (61.82 ± 4.81) $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.01$). In conclusion, black highland barley is a high-quality raw material for producing *Monascus* rich in GABA, nucleosides, and anthocyanins, providing a reference for the selection of raw material varieties in highland barley *Monascus* production.

Keywords: *Monascus purpureus*; highland barley *Monascus*; γ -aminobutyric acid; nucleoside; anthocyanin

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.016

中图分类号: TS201.3

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 06-0122-07

引文格式:

李芳, 李斐然, 黄卫锋, 等. 不同品种青稞固态发酵制备青稞红曲活性成分的差异分析[J]. 中国酿造, 2026, 45(6): 122-128.

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.016. <http://www.chinabrewing.net.cn>

LI Fang, LI Feiran, HUANG Weifeng, et al. Differential analysis of active components in highland barley *Monascus* prepared by solid-state fermentation with different highland barley varieties[J]. China Brewing, 2026, 45(6): 122-128. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.016. <http://www.chinabrewing.net.cn>

青稞 (*Hordeum vulgare* Linn.) 是一种重要的高原谷类作物, 主要分布于我国西藏、青海、甘肃、四川和云南等高原地区^[1-2], 根据颜色不同, 青稞可分为黑青稞、蓝青稞、白青稞3个品种。青稞红曲是以青稞为发酵基质, 通过紫色红曲霉 (*Monascus purpureus*) 固态发酵而成的高原特色功能性产品^[3-4]。该产品既承袭了传统红曲的药用价值, 更因独特的高原环境与青稞基质的共同作用, 形成了独特的活性成分代谢谱系。研究表明, 其降血糖、降血脂、降血压及抗氧化等药理作用与洛伐他汀、 β -葡聚糖、麦角甾醇、 γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA)、核苷类物质及花青素等关键功效成分密切相关^[5-6]。

GABA作为青稞红曲的特色成分, 其来源兼具内源 (青稞自身) 与外源 (微生物发酵) 2个方面。研究揭示, GABA不仅是中枢神经系统的抑制性神经递质, 更能通过调节肾素-血管紧张素系统实现降压^[7]; 其在改善2型糖尿病空腹血糖^[8]与调节脂代谢基因表达^[9]方面的作用预示了其综合代谢调节潜力。核苷类成分是维持机体生命活动的基础物质, 参与DNA代谢活动, 兼具免疫调节、抗病毒、扩血管、调节睡眠等多种生物活性^[10-11]。当内源性核苷供应不足时, 外源性补充显得尤为重要。其中, 腺苷因其明确的扩血管、抗炎、抗氧化及心脑血管保护作用, 已成为青稞红曲质控的核心指标^[12]。花青素是一类广泛存在于植物中的水溶性天然色素, 属于黄酮类化合物^[13]。研究表明, 花青素具有很强的抗氧化作用, 能够清除自由基, 减缓衰老过程, 同时还具有抗癌、促进心血管健康等功能^[14-15]。因此, 青稞红曲中腺苷、GABA、花青素与洛伐他汀共同构成了“四位一体”的心脑血管保护复合体系, 这正是其区别于普通红曲的独特物质基础。然而, 目前针对青稞红曲中GABA、核苷类成分和花青素含量的系统性研究较少, 精准测定三者含量是科学解锁青稞红曲“降三高+抗焦虑+抗氧化”三重健康功效, 打造高原特色功能食品品牌, 推动西藏、青海等地相关产业升级的核心一环。

本课题组前期研究了不同品种青稞红曲在发酵前后酸式与内酯式洛伐他汀、麦角甾醇及 β -葡聚糖的含量变化^[16]。在此基础上, 本研究以黑、蓝、白3种不同品种的青稞为底物, 通过紫色红曲霉 (*Monascus purpureus*) 固态发酵制备青稞红曲, 采用高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 法测定并对比分析不同青稞红曲中GABA、8种核苷成分 (尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷、腺苷) 及花青素的含量, 旨在揭示青稞品种与青稞红曲活性成分之间的对应关系, 进而选择最优发酵青稞品种, 期为青稞红曲的市场开发与产业高质量发展提供坚实的数据支撑与参考依据。

1 材料与方法

1.1 菌株、材料与试剂

紫色红曲霉 (*Monascus purpureus*) 由中国科学院微生物研究所鉴定, 保藏于本实验室-80℃冰箱。

黑青稞、蓝青稞、白青稞购于专卖店。

鸟苷标准品 (纯度>93.6%) 中国食品药品检定研究院; GABA、尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、胸苷、腺苷标准品 (纯度均>98.0%)、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷标准品 (纯度>95.0%) 成都普思生物科技股份有限公司; 葡萄糖 (分析纯)、蛋白胨 (生化试剂) 北京奥博星生物技术有限责任公司; 甲醇、乙腈 (均为色谱纯)、甲醇、乙酸铵、乙醇、硼酸、氢氧化钠、邻苯二甲醛 (*o*-phthalaldehyde, OPA)、巯基乙醇、甲酸、盐酸 (均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司; 超纯水 实验室自制。

液体种子培养基: 葡萄糖 60 g/L、蛋白胨 10 g/L、青稞粉 2 g/L、 NaNO_3 2 g/L、 MgSO_4 2 g/L、 KH_2PO_4 1 g/L, pH值自然。121℃灭菌20 min。

固态发酵培养基：青稞粉碎成40~50目，放入1 000 mL三角瓶中，每瓶160 g，加水48 mL，浸润30 min。121 ℃灭菌20 min。

1.2 仪器与设备

LC-2030C Plus HPLC仪、WondaSil C₁₈ Superb色谱柱（4.6 mm×250 mm，5 μm）日本Shimadzu公司；Cosmosil 5 C₁₈-MS-II色谱柱（4.6 mm×250 mm，5 μm）日本Nacalai Tesque公司；KQ-100DB 超声波清器 昆山市超声仪器有限公司；H1750台式高速离心机 湖南湘仪实验室开发有限公司；XS105 分析天平 瑞士梅特勒托利多公司；Genie U 超纯水机 上海乐枫生物科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 青稞红曲的制备

参照文献[16]制备青稞红曲。

1.3.2 GABA含量测定

GABA含量：采用HPLC法测定。

前处理：称取硼酸2.47 g，加85 mL水溶解，再用氢氧化钠调pH值至10.2，即得硼酸缓冲液。称取OPA 0.6 g，用30 mL甲醇溶解，再加入前述硼酸缓冲液120 mL和巯基乙醇1.8 mL，混合均匀后即得OPA衍生液。

分别准确称取以黑青稞、蓝青稞、白青稞为基质固态发酵制备的青稞红曲各1.0 g样品粉末，分别加入5 mL 60%乙醇进行超声波提取20 min，在4 000 r/min转速下离心20 min，分别量取0.4 mL上清液，加入1.6 mL OPA衍生液进行衍生化反应，振荡10 s，静置3 min后，经0.45 μm有机滤膜，待测^[17]。

HPLC条件：Cosmosil 5 C₁₈-MS-II色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm），以乙腈-0.02 mol/L乙酸铵水溶液（19:81，V/V）为流动相。检测波长为320 nm，流速为1.0 mL/min，柱温为30 ℃，进样量为20 μL^[18-19]。

定性定量分析：以GABA标样的保留时间为依据，对样品中GABA进行定性。以GABA的质量浓度（x）为横坐标，以峰面积（y）为纵坐标绘制GABA标准曲线，得到回归方程为 $y=17\,536x-12\,874$ ，决定系数（ R^2 ）为0.999 8。按照标准曲线回归方程计算GABA含量。

1.3.3 核苷成分含量测定

核苷成分含量：采用HPLC法测定。

前处理：分别准确称取以黑、蓝、白3种青稞为基质发酵制备的青稞红曲各1.0 g样品，分别放入10 mL容量瓶中，加入纯水至刻度，摇匀，超声30 min，取出冷却至室温，取滤液过0.22 μm水膜滤膜，即得供试样品溶液。

HPLC条件^[20-21]：Cosmosil 5 C₁₈-MS-II色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm），流动相A为水，流动相B为甲醇，梯度洗脱：0~10.0 min，98%~95% A；10.0~15.0 min，95%~85% A；15.0~22.0 min，85%~83% A；

22.0~26.0 min，83%~80% A；26.0~26.5 min，80%~98% A；26.5~37.0 min，98% A。检测波长为260 nm，流速为1.0 mL/min，柱温30 ℃，进样体积为15 μL。

定性定量分析：以尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷标准品的保留时间为依据，分别对样品中尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷进行定性。以核苷标准品的质量浓度（x）为横坐标，以峰面积（y）为纵坐标绘制标准曲线，回归方程和 R^2 见表1。按照标准曲线回归方程计算核苷成分含量。

表1 8种核苷成分的标准曲线回归方程和决定系数
Table 1 Regression equations and determination coefficients of standard curves for eight nucleoside components

核苷标准品	回归方程	R^2
尿嘧啶	$y=55\,648x-1\,557.7$	1.000 0
胞苷	$y=33\,768x-1\,865.8$	0.999 9
次黄嘌呤	$y=53\,036x-4\,008.2$	1.000 0
腺嘌呤	$y=95\,602x-15\,909$	0.999 9
肌苷	$y=31\,495x-4\,766.5$	1.000 0
鸟苷	$y=5\,120.7x-363.74$	1.000 0
胸苷	$y=18\,499x-1\,391.5$	0.999 8
腺苷	$y=53\,958x+7\,656.4$	0.999 7

1.3.4 花青素含量测定

花青素含量（以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷计）：采用HPLC法测定。

前处理^[22]：分别准确称取以黑青稞、蓝青稞、白青稞为基质发酵制备的青稞红曲各1.0 g样品，分别放入10 mL容量瓶中，加入酸化乙醇（乙醇：水：盐酸=2:1:1，V/V）定容。摇匀1 min后，超声30 min，100 ℃恒温水浴锅中水解1 h，取出待其冷却后，用酸化的乙醇稀释至刻度线，随后过滤，取得的滤液再经0.45 μm滤膜过滤，即得供试品溶液。

HPLC条件^[23-24]：WondaSil C₁₈ Superb色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm），流动相A为1%（V/V）甲酸溶液，流动相B为1%（V/V）甲酸乙腈溶液，梯度洗脱程序为0~2 min，8%~12% B；2~5 min，12%~18% B；5~10 min，18%~20% B；10~12 min，20%~25% B；12~15 min，25%~30% B；15~18 min，30%~45% B；18~20 min，45%~80% B；20~22 min，80%~8% B；22~33 min，8% B。检测波长530 nm，流速0.8 mL/min，柱温35 ℃，进样量20 μL。

定性定量分析：以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷标准品的保留时间为依据，对样品中花青素进行定性。以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的质量浓度（x）为横坐标，

以峰面积 (y) 为纵坐标绘制标准曲线, 回归方程为 $y = 65\,359x - 96\,010$, R^2 为 0.999 1。按照标准曲线回归方程计算花青素含量。

1.4 数据处理

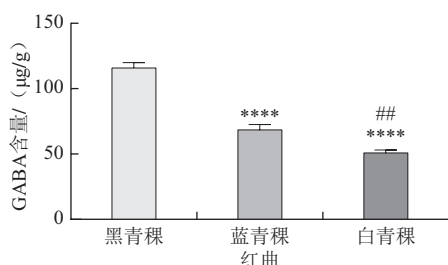
采用 SPSS 26.0 进行数据整理及分析, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示 ($n=3$), 统计结果 $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。采用 OriginPro 2025 和 GraphPad Prism 9.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同品种青稞固态发酵青稞红曲中 GABA 的含量

微生物发酵法是高效富集 GABA 的一种方式, 其是利用微生物体内含有的谷氨酸脱羧酶, 将谷氨酸脱羧转化为 GABA, 目前, 红曲霉已被广泛用于发酵生产 GABA, 发酵过程可有效提高产物中 GABA 含量^[25]。以青稞作为发酵基质经紫红曲霉固态发酵成青稞红曲, 可通过青稞本身 (内源) + 红曲霉发酵 (外源) 双重途径实现 GABA 的高水平积累。

黑青稞红曲、蓝青稞红曲和白青稞红曲中 GABA 的含量分别为 $112.66 \sim 120.12$ 、 $65.62 \sim 72.86$ $\mu\text{g/g}$ 和 $49.50 \sim 53.22$ $\mu\text{g/g}$, 以不同品种青稞发酵后的青稞红曲中 GABA 含量平均值对比, 由图 1 可知, 黑青稞红曲中 GABA 含量 (116.13 ± 3.76) $\mu\text{g/g}$ 高度显著高于蓝青稞红曲 (68.85 ± 3.68) $\mu\text{g/g}$ 、白青稞红曲 (51.17 ± 1.89) $\mu\text{g/g}$ ($P < 0.000\,1$), 蓝青稞与白青稞红曲中 GABA 含量差异极显著 ($P < 0.01$)。



与黑青稞红曲组相比, ****. $P < 0.000\,1$ 。
与蓝青稞红曲组相比, ##. $P < 0.01$ 。图 2 同。

图 1 不同品种青稞固态发酵制备青稞红曲中 GABA 含量比较

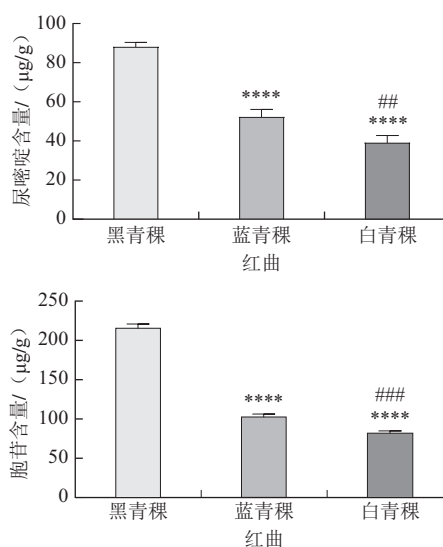
Fig. 1 Comparison of GABA contents in highland barley *Monascus* prepared by solid-state fermentation of different highland barley varieties

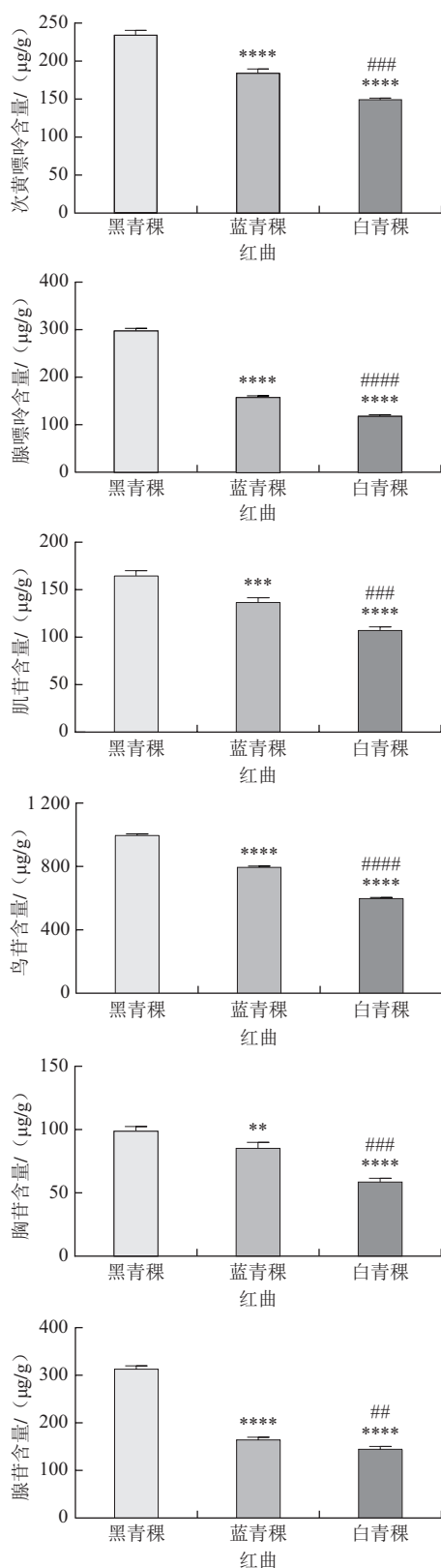
2.2 不同品种青稞固态发酵青稞红曲中核苷成分含量

核苷根据碱基类型分为嘌呤核苷及嘧啶核苷, 嘌呤核苷主要有腺苷、鸟苷、肌苷及其他嘌呤类核苷, 嘧啶核苷主要有胞苷、尿苷及胸苷等。腺苷具有明确的扩血管、抗炎抗氧化及心脑血管保护作用; 鸟苷、肌苷可通过调节过氧聚合酶舒张血管; 胞苷、尿苷有免疫调节、抗肿瘤作用^[12]。

黑青稞红曲中尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷含量分别为 $85.89 \sim 90.30$ 、 $211.52 \sim 220.76$ 、 $230.20 \sim 241.38$ 、 $293.30 \sim 302.59$ 、 $160.61 \sim 170.35$ 、 $993.50 \sim 1\,006.28$ 、 $95.25 \sim 101.81$ 、 $308.78 \sim 320.55$ $\mu\text{g/g}$, 蓝青稞红曲中尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷含量分别为 $48.65 \sim 56.21$ 、 $100.29 \sim 106.33$ 、 $180.55 \sim 190.38$ 、 $155.38 \sim 160.91$ 、 $133.28 \sim 142.19$ 、 $792.20 \sim 802.33$ 、 $81.28 \sim 90.05$ 、 $160.89 \sim 170.23$ $\mu\text{g/g}$, 白青稞红曲中尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷含量分别为 $35.37 \sim 42.60$ 、 $80.88 \sim 85.25$ 、 $14.51 \sim 151.25$ 、 $116.15 \sim 120.62$ 、 $103.85 \sim 110.45$ 、 $595.37 \sim 604.29$ 、 $56.10 \sim 60.60$ 、 $140.21 \sim 150.35$ $\mu\text{g/g}$ 。

由图 2 可知, 黑青稞红曲中尿嘧啶 (88.15 ± 2.21) $\mu\text{g/g}$ 、胞苷 (216.24 ± 4.62) $\mu\text{g/g}$ 、次黄嘌呤 (234.59 ± 5.97) $\mu\text{g/g}$ 、腺嘌呤 (298.05 ± 4.65) $\mu\text{g/g}$ 、肌苷 (165.12 ± 4.91) $\mu\text{g/g}$ 、鸟苷 (998.33 ± 6.94) $\mu\text{g/g}$ 、胸苷 (99.08 ± 3.41) $\mu\text{g/g}$ 和腺苷含量 (313.91 ± 6.03) $\mu\text{g/g}$ 显著高于蓝青稞红曲 (52.30 ± 3.79)、(103.25 ± 3.02)、(184.58 ± 5.15)、(158.21 ± 2.77)、(137.01 ± 4.63)、(797.47 ± 5.08)、(85.55 ± 4.39)、(165.12 ± 4.73) $\mu\text{g/g}$ 与白青稞红曲 (39.16 ± 3.63)、(82.60 ± 2.33)、(149.93 ± 1.37)、(118.44 ± 2.24)、(107.54 ± 3.37)、(600.30 ± 4.53)、(59.00 ± 2.51)、(145.54 ± 5.09) $\mu\text{g/g}$ ($P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 、 $P < 0.000\,1$), 蓝青稞红曲中尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷含量与白青稞红曲相比有显著差异 ($P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 、 $P < 0.000\,1$)。





与黑青稞红曲组相比, ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。
与蓝青稞红曲组相比, ### $P < 0.001$, #### $P < 0.0001$ 。图3同。

图2 不同品种青稞发酵制备青稞红曲中8种核苷成分含量比较
Fig. 2 Comparison of contents of eight nucleoside components in highland barley *Monascus* prepared by solid-state fermentation of different highland barley varieties

2.3 不同品种青稞固态发酵青稞红曲中花青素含量

花青素具有较强的抗氧化作用,能直接中和自由基,减少氧化应激^[26],可保护GABA能神经元免受氧化损伤,从而间接支持和稳定GABA的神经调节功能^[27-28],保护核苷类成分免受降解,确保细胞能量供应和正常代谢的物质基础稳定^[29],保护血管内皮细胞,为GABA、腺苷和鸟苷的血管调节作用创造健康的功能环境^[30]。

白青稞红曲未检出花青素,黑青稞红曲、蓝青稞红曲中花青素的含量分别为75.24~86.19、56.70~66.25 $\mu\text{g/g}$ 。对不同品种青稞发酵后的青稞红曲中花青素含量平均值进行对比,由图3可知,黑青稞红曲中花青素含量(81.05 ± 5.51 $\mu\text{g/g}$)极显著高于蓝青稞红曲(61.82 ± 4.81 $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.01$)。孟胜亚等^[31]检测有色青稞中黑青稞的花青素含量最高,含量为53.58 $\mu\text{g/g}$ 。邓俊琳等^[32]检测紫青稞中有高含量花青素,而糯青稞(白青稞)未检测到花青素。有研究认为,大麦籽粒颜色与花青素含量之间存在密切关系,可通过谷物籽粒外观颜色初步判断花青素含量的高低^[33]。

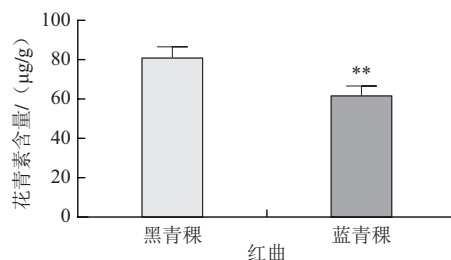


图3 不同品种青稞固态发酵制备青稞红曲中花青素含量比较
Fig. 3 Comparison of anthocyanin contents in highland barley *Monascus* prepared by solid-state fermentation with different highland barley varieties

黑青稞红曲中花青素平均含量高达81.05 $\mu\text{g/g}$,这与其突出的抗氧化活性密切相关。黑青稞本身富含花青素、高蛋白、高纤维及多种维生素,构成了独特的营养成分谱,具有其他青稞所没有的特殊高抗氧化活性营养成分,其营养成分较水稻、小麦、玉米高^[34-35]。其原因可能是这些特有的营养物质及其代谢产物为红曲霉发酵提供了优势底物,可能定向调控其代谢通量,从而协同促进GABA与核苷类成分的生物合成与累积。

3 结论

本研究以黑、蓝、白3种青稞为基质固态发酵制备青稞红曲,比较黑青稞、蓝青稞、白青稞红曲在GABA、

核苷成分以及花青素等主要活性物质含量方面的差异。结果表明,在GABA含量方面,黑青稞红曲中GABA的含量(116.13 ± 3.76) $\mu\text{g/g}$ 高度显著高于其他2种青稞红曲($P < 0.0001$),分别为蓝青稞红曲和白青稞红曲的约1.7倍和2.3倍,表明黑青稞作为基质更有利于GABA的富集,提示其在调节神经系统功能相关产品开发中具备潜在优势。在核苷成分含量方面,在黑青稞红曲中尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、腺嘌呤、肌苷、鸟苷、胸苷和腺苷等多种核苷均呈现较高含量,进一步印证了黑青稞在青稞红曲发酵过程中对核苷成分的积累具有明显促进作用,这对于提高青稞红曲产品在能量代谢、免疫调节等方面的生物活性具有重要意义。在花青素含量方面,黑青稞红曲花青素含量为(81.05 ± 5.51) $\mu\text{g/g}$,极显著高于蓝青稞红曲($P < 0.01$),而在白青稞红曲中未检出,说明花青素的积累与青稞本身的颜色特征密切相关。本研究结果证明,黑青稞是制备富含GABA、核苷类成分以及花青素等多种功能成分的高品质青稞红曲的优质原料。该研究不仅为青稞红曲的原料选择提供了科学依据,也为后续相关功能性产品的深度开发和质量标准建立奠定了基础。

参考文献:

- [1] XIE J J, HONG Y, GU Z B, et al. Highland barley starch: structures, properties, and applications[J]. Foods, 2023, 12(2): 387. DOI:10.3390/foods12020387.
- [2] 仁增. 青稞在食品中的应用[J]. 食品安全导刊, 2024(17): 128-130.
- [3] ZHOU X L, WANG J Y, SHAO G G, et al. Bidirectional solid-state fermentation of highland barley by edible fungi to improve its functional components, antioxidant activity and texture characteristics[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2024, 79(2): 308-315. DOI:10.1007/s11130-024-01166-x.
- [4] 扎西穷达, 巴桑琼达, 次仁卓嘎, 等. 青稞活性成分与功能作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 256-262. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240918004.
- [5] WU H Y, DANG B, ZHANG W G, et al. Metabolomics characterization of chemical composition and bioactivity of highland barley *Monascus* tea decoction before and after simulated digestion *in vitro*[J]. Foods, 2024, 13(23): 3950. DOI:10.3390/foods13233950.
- [6] ZHU M N, WU G, CHEN J, et al. Ethnopharmacology, phytochemistry, and pharmacology of highland barley *Monascus purpureus* went: a comprehensive review[J]. Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening, 2023, 26(6): 1083-1092. DOI:10.2174/1386207325666220818153054.
- [7] DENG Q J, WEN Y, ZHANG R M, et al. Construction of corynebacterium glutamicum for producing γ -aminobutyric acid and analysis of the fermentation process[J]. Fermentation, 2025, 11(9): 534.
- [8] 陆阳, 郑鸿雁, 王子腾. 藜麦发酵液工艺优化及调节血糖作用的研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 56-60. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2020.02.016.
- [9] 李莹. 富 γ -氨基丁酸麦麸干预高脂饮食诱发代谢紊乱的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- [10] 侯月彩, 黄小凤, 杜蕾蕾. UPLC-MS/MS测定不同配比当归补血汤中的12个核苷类成分[J]. 华西药学杂志, 2025, 40(4): 439-444. DOI:10.13375/j.cnki.wcjps.2025.04.017.
- [11] 张雪梅, 杨丰庆, 夏之宁. 食品中核苷类成分的药理作用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(9): 277-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201209058.
- [12] 丁兴杰, 熊亮, 周勤梅, 等. 天然核苷类成分的化学结构和药理活性研究进展[J]. 成都中医药大学学报, 2018, 41(2): 102-108. DOI:10.13593/j.cnki.51-1501/r.2018.02.102.
- [13] 朱明霞, 白婷, 张玉红. 黑青稞花青素研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(10): 294-299. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2023.10.038.
- [14] 黄本宸, 舒森彪, 李曼玲, 等. 黑青稞花青素的研究进展[J]. 轻工科技, 2024, 40(1): 38-41.
- [15] TANG C, HAN J Q, CHEN D, et al. Recent advances on the biological activities of purple sweet potato anthocyanins[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102670. DOI:10.1016/j.fbio.2023.102670.
- [16] 李芳, 李斐然, 张梦实, 等. 基于青稞品种差异的青稞红曲活性成分的测定及比较研究[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(3): 401-407. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044449.
- [17] 毕继全, 王希通, 陈林伟, 等. 萌芽黑青稞喷干粉的主要成分测定及HPLC指纹图谱的建立[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 293-303. DOI:10.16429/j.1009-7848.2022.09.031.
- [18] 孙康娜, 丁红艳, 李岩, 等. 黑青稞 γ -氨基丁酸提取工艺优化及体外降血糖活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(4): 127-133. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2024.04.017.
- [19] 李婷玉, 杜艳, 陈正行, 等. 胁迫萌发对青稞籽粒中 β -葡聚糖和 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 30-35. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2021.06.006.
- [20] 刘焱, 黄小兰, 曾莹, 等. HPLC法同时测定延胡索不同部位中11种核苷类成分[J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(3): 38-44. DOI:10.3969/j.issn.1006-9690.2023.03.007.
- [21] 赵顺鑫, 周浓, 杨琳琳, 等. 不同产地浙贝母中10种核苷类成分含量分析[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(10): 35-40. DOI:10.3969/j.issn.1006-9690.2020.10.006.
- [22] 孟俊文, 田翔. HPLC测定紫玉米中花青素的含量[J]. 现代农业科技, 2020(17): 210-211. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2020.17.123.
- [23] GUO Y Y, ZHANG H, SHAO S, et al. Anthocyanin: a review of plant sources, extraction, stability, content determination and modifications[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(12): 7573-7591. DOI:10.1111/ijfs.16132.
- [24] 谷如祥, 冯淑贞, 刘聪慧, 等. 8种彩色马铃薯中花青素含量测定及其在贮藏过程中的含量变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 239-247. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240925004.
- [25] 周俊萍, 徐玉娟, 温靖, 等. γ -氨基丁酸(GABA)的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 393-401. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023050004.
- [26] PAREDES-LÓPEZ O, CERVANTES-CEJA M L, VIGNA-PÉREZ M, et al. Berries: improving human health and healthy aging, and promoting quality life: a review[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2010, 65(3): 299-308.

- [27] PIERRE F, MARTINE C, MICHEL L. Incorporation of arachidonic and docosahexaenoic acids into phospholipids of rat brain membranes[J]. *Neuroscience Letters*, 1994, 171(1/2):137-141. DOI:10.1016/0304-3940(94)90624-6.
- [28] TAROZZI A, MORRONI F, HRELIA S, et al. Neuroprotective effects of anthocyanins and their *in vivo* metabolites in SH-SY5Y cells[J]. *Neuroscience Letters*, 2007, 424: 36-40. DOI:10.1016/j.neulet.2007.07.017.
- [29] WANG H, CAO G H, PRIOR R L. Oxygen radical absorbing capacity of anthocyanins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(2): 304-309. DOI:10.1021/jf960421t.
- [30] RODRIGUEZ-MATEOS A, ISHISAKA A, MAWATARI K, et al. Blueberry intervention improves vascular reactivity and lowers blood pressure in high-fat-, high-cholesterol-fed rats[J]. *British Journal of Nutrition*, 2013, 109(10): 1746-1755.
- [31] 孟胜亚, 张文会, 于翠翠, 等. 西藏12个青稞品种(系)籽粒营养品质的比较分析[J]. *大麦与谷类科学*, 2019, 36(6): 1-5. DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2019.06.001.
- [32] 邓俊琳, 夏陈, 杨开俊, 等. 青稞全谷物、青稞米和青稞麸皮中多酚化合物的定量分析及抗氧化活性评价[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(21): 246-253. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023110217.
- [33] 张毅, 东强, 冯西博, 等. 不同粒色大麦花青素含量与籽粒颜色关系的研究[J]. *高原农业*, 2022, 6(3): 213-219. DOI:10.19707/j.cnki.jpa.2022.03.001.
- [34] 赵希雷, 张智勇, 解树珍, 等. 黑青稞的营养价值与产品开发分析与展望[J]. *粮食加工*, 2022, 47(4): 29-32. DOI:10.20170/j.cnki.lsjg.2022.04.006.
- [35] 甘子鹏, 徐海燕, 薛守业, 等. 青藏高原不同气候区青稞品质差异[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(11): 2421-2427. DOI:10.16213/j.cnki.scjas.2022.10.023.