

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250411003

引用格式: 王佳琦, 王朝, 张玉蕾, 等. 高压电场结合酸性电解水处理富集甜荞 γ -氨基丁酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 147–153.

WANG JQ, WANG Z, ZHANG YL, *et al.* Enrichment of γ -aminobutyric acid in *Fagopyrum esculentum* by the combination of high-voltage electric field and acidic electrolyzed water treatment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 147–153. (in Chinese with English abstract).

高压电场结合酸性电解水处理富集甜荞 γ -氨基丁酸

王佳琦^{1,2}, 王朝^{1,2}, 张玉蕾^{1,2}, 韩云云², 狄建兵^{1,2}, 冯志宏^{1,2}, 王愈^{1,2*}

(1. 山西农业大学食品科学与工程学院, 晋中 030801;
2. 山西省果蔬贮藏保鲜与加工技术创新中心, 晋中 030801)

摘要: **目的** 探究高压电场(high-voltage electric field, HVEF)、酸性电解水(acidic electrolyzed water, AEW)以及二者联合处理对甜荞对 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)富集的影响。**方法** 对甜荞分别进行 HVEF、AEW 及联合处理, 测定萌发过程不同时间点(0、8、12、32、40 h)的形态学指标(百粒重、萌发率、芽长), 并检测 GABA 含量、谷氨酸脱羧酶(glutamate decarboxylase, GAD)活性、 γ -氨基丁酸转氨酶(γ -aminobutyric acid transaminase, GABA-T)活性及琥珀酸半醛脱氢酶(succinic semialdehyde dehydrogenase, SSADH)活性, 分析不同处理对 GABA 富集的影响。**结果** 不同处理均能提升甜荞中 GABA 含量而联合处理效果更加显著, 联合处理条件下甜荞萌发 24 h GABA 含量达 198.72 mg/100 g, 较对照组提高 35.6%, 较 AEW 和 HVEF 处理组分别提高 8.3%和 6.1%, 表现出显著协同效应。联合处理的双重调控通过激活 GAD 活性、抑制 GABA-T 和 SSADH 活性, 促进了 GABA 合成。**结论** 本研究分析甜荞萌发过程中 GABA 代谢通路酶活性的变化, 揭示了 HVEF 结合 AEW 通过“激活合成酶-抑制分解酶”的双重机制实现 GABA 高效富集, 为功能性荞麦萌动食品开发提供了新方法。

关键词: 酸性电解水; 电场; 荞麦; γ -氨基丁酸; 酶活力

Enrichment of γ -aminobutyric acid in *Fagopyrum esculentum* by the combination of high-voltage electric field and acidic electrolyzed water treatment

WANG Jia-Qi^{1,2}, WANG Zhao^{1,2}, ZHANG Yu-Lei^{1,2}, HAN Yun-Yun², DI Jian-Bing^{1,2},
FENG Zhi-Hong^{1,2}, WANG Yu^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;
2. Shanxi Center of Technology Innovation for Storage and Processing of Fruit and Vegetable, Jinzhong 030801, China)

收稿日期: 2025-04-11

基金项目: 山西省研究生实践创新项目(2024SJ121); 吕梁市重点研发项目(2024NY14); 晋中国家农高区食品科学与工程教授、博士工作站资助项目(JZNGQBSGZZ003)

第一作者: 王佳琦(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: 17629034413@163.com

*通信作者: 王愈(1968—), 男, 教授, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: sxnydxwy@163.com

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of high-voltage electric field (HVEF), acidic electrolyzed water (AEW) and their combined treatment on γ -aminobutyric acid (GABA) enrichment in germinating *Fagopyrum esculentum*. **Methods** *Fagopyrum esculentum* seeds were respectively treated with HVEF, AEW, and the combined AEW+HVEF treatment. Morphological indices (100-seed weight, germination rate, shoot length), GABA content, and activities of glutamate decarboxylase (GAD), γ -aminobutyric acid transaminase (GABA-T) and succinic semialdehyde dehydrogenase (SSADH) were measured at different time points during germination (0, 8, 12, 32 and 40 h) to analyze the effects of different treatments on GABA enrichment. **Results** All treatments increased GABA content in *Fagopyrum esculentum*, with the combined treatment showing a more significant effect. Under the combined treatment, GABA content in germinating *Fagopyrum esculentum* reached 198.72 mg/100 g at 24 h of germination, which was 35.6% higher than the control group, and 8.3% and 6.1% higher than the AEW and HVEF single-treatment groups, respectively, demonstrating a significant synergistic effect. The dual regulation of the combined treatment promoted GABA accumulation by activating GAD activity and inhibiting GABA-T and SSADH activities. **Conclusion** This study analyzes the changes in enzyme activities of the GABA metabolic pathway during *Fagopyrum esculentum* germination, revealing that the combined treatment of HVEF and AEW achieves efficient GABA enrichment through a dual mechanism of “activating synthesis enzymes and inhibiting decomposition enzymes”. The findings provide a new method for developing functional germinated *Fagopyrum esculentum* foods.

KEY WORDS: acidic electrolyzed water; electric field; *Fagopyrum esculentum*; γ -aminobutyric acid; enzyme activity

0 引言

甜荞(*Fagopyrum esculentum*)是一种无麸质的假谷物,富含必需氨基酸、膳食纤维、矿物质和生物活性化合物等多种对人体有益的营养成分^[1],在全球粮食体系和健康饮食领域发挥着重要作用。此外在甜荞萌发过程中,会显著富集 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)^[2]。GABA 作为一种非蛋白质氨基酸,对人类和动物具有积极影响,包括降低血压和抑制癌细胞的增殖^[3]、抗焦虑、改善睡眠等多种生理功能^[4-5]。GABA 的合成与分解,主要由谷氨酸脱羧酶(glutamate decarboxylase, GAD)、 γ -氨基丁酸转氨酶(γ -aminobutyric acid transaminase, GABA-T)和琥珀酸半醛脱氢酶(succinic semialdehyde dehydrogenase, SSADH)等关键酶协同调控^[6-7]。GAD 作为合成 GABA 的限速酶,其活性高低直接影响 GABA 的合成量^[4-8];而 GABA-T 和 SSADH 则主导 GABA 的分解代谢过程^[6-7]。

现有调控技术研究主要集中于温度^[9-10]、气调^[11-12]、压力^[13]及外源添加物^[12]的干预。YU 等^[9]通过低温胁迫黑米籽粒发芽促进了 GABA 的积累,YOON 等^[10]研究了低温胁迫对菠菜 GABA 的影响;YU 等^[13]的研究发现随着蒸煮压力的升高糙米中 GABA 的含量显著下降;BRİKIS 等^[11]结合代谢和转录组学技术分析了低 O₂ 和高 CO₂ 环境胁迫对苹果果实 GABA 含量的影响,WU 等^[12]探究了低氧环境中添加氨基胍对鲜茶叶 GABA 的影响。这几种加工技术虽展现出巨大潜力,但仍存在局限,尤其是低温冻伤、流程复杂及成本高等。近年来,物理与化学处理技术在调控作物种子萌发及功能性成分积累方面展现出巨大潜力。酸性

电解水(acidic electrolyzed water, AEW)是一类新型环境友好型抗菌消毒剂,通过电解稀氯化钠或盐酸溶液制得。凭借其独特的理化性质,可调节种子细胞膜透性,激活酶活性^[14-17],从而影响功能成分的积累。此外 AEW 接触有机物或被自来水稀释后,很容易转化为普通水,对环境或人体健康不构成威胁^[18-19];高压静电场(high-voltage electric field, HVEF)是一种可控无污染的物理方法,其在食品加工中的潜力备受关注。许多学者认为其影响机制可能是由于高电压静电电离空气,使之产生离子雾和一定量的臭氧^[20-21],其中的负离子具有抑制新陈代谢、降低呼吸强度、减弱酶的活性等作用^[21],同时还可通过影响自由基相关生化过程^[22-23],刺激蛋白质和酶的活性^[24-25],提升种子活力。

AEW 与 HVEF 对萌发种子的影响已有报道,HAO 等^[2]通过微酸性电解水处理提升了荞麦 GABA 的积累,XU 等^[26]研究了高压电场对燕麦种子的生物影响,然而联合处理对甜荞萌发过程中 GABA 积累及其合成相关酶活性的交互作用机制研究较少。因此本研究创新性地构建酸性电解水与高压电场双重胁迫调控体系,通过测定萌发参数、GABA 含量及代谢酶活性动态变化,以期揭示其潜在调控机制,为功能性甜荞萌动食品的开发提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甜荞:内蒙古赤峰;酸性电解水:实验室制得。

GABA 标准品(色谱纯,北京索莱宝科技有限公司);次氯酸钠溶液(分析纯,天津市天力化学试剂有限公司);无水乙醇(分析纯,北京华腾化工有限公司);重蒸苯酚(分

析纯, 上海蓝季科技有限公司); 四硼酸钠(分析纯, 天津市北辰方正试剂厂); GAD 酶联免疫吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒(江苏晶美生物科技有限公司); 植物 GABA-TELISA 试剂盒、SSADHELISA 试剂盒(江苏酶免实业有限公司)。

1.2 仪器与设备

HVEF 实验系统由实验团队自主研发, 该装置中负责产生电场的主要组件: 高压发生器[DW-N303-1AC 型高压直流电源(天津东文高压电源厂)]; XYS-C-12 型电解功能水生生成器(宝鸡新宇光机电有限责任公司); PR224ZH/E 型电子天平[精度 0.001 g, 奥豪斯仪器(常州)有限公司]; LDZ5-2 型低速自动平衡离心机(北京雷勃尔离心机有限公司); UV-1100 型分光光度计(上海美谱达仪器有限公司); LRHS-250-II型恒温恒湿培养箱(上海跃进医疗器械有限公司); KQ-250DE 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); HC-2518R 型高速冷冻离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司); DL92150P 游标卡尺(湖南强德电子科技有限公司); FW400A 多功能粉碎机(北京科伟永兴仪器有限公司); ORP-986 笔式 ORP 计(广州市铭睿电子科技有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 酸性电解水制备

对质量分数为 3%的氯化钠溶液进行电解以制备 AEW。AEW 的处理参数为: 氧化还原电位 1140 mV、pH 2.5、有效氯质量浓度 101 mg/L。

pH: 用 pH 计测定; 有效氯: 碘量法测定; 氧化还原电位: 用 ORP 计测定。

1.3.2 甜荞处理

甜荞挑选并清洗后被随机分为 4 组, 每组设置 3 个生物学重复。具体处理分组及标签如下: (1) CK(对照组, 35 °C 蒸馏水浸泡 3 h 后, 在温度 25 °C, 湿度 80%环境中萌发 40 h); (2) AEW (35 °C酸性电解水浸泡 3 h 后, 在温度 25 °C, 湿度 80%环境中萌发 40 h); (3) HVEF (35 °C蒸馏水浸泡 3 h 后接受 100 kV/m HVEF 处理 30 min, 在温度 25 °C, 湿度 80%环境中萌发 40 h); (4) AEW+HVEF (35 °C酸性电解水浸泡 3 h 后接受 100 kV/m HVEF 处理 30 min, 在温度 25 °C, 湿度 80%环境中萌发 40 h)。

1.3.3 甜荞形态学指标测定

甜荞萌发过程中的形态学指标为芽长、百粒重、萌发率。芽长测量时用游标卡尺测量, 每次测量选取 30 个样品; 百粒重测量时使用电子天平, 选取 100 粒样品进行测定, 测量时拿滤纸吸干甜荞表面水分; 萌发率选取 100 粒样品进行测定, 重复测定 3 次。

1.3.4 GABA 提取及测定

对萌发后样品进行真空冷冻干燥处理, 样品经冻干

后使用粉碎机粉碎过 80 目筛, 样品粉末用塑封袋密封、避光保存, 以待测定。

GABA 提取: 称取 3 g 样品粉末, 加蒸馏水混匀至 30 mL 后在 35 °C 的条件下超声 30 min, 提取液 5000 r/min 离心 20 min, 取上清液备测。

GABA 测定: 采用 Berthelot 比色法测定甜荞中 GABA 含量。

1.3.5 GABA 合成相关酶活性测定

本研究采用 ELISA 试剂盒对 GAD、GABA-T 和 SSADH 酶活性进行定量分析。按照提供方式进行样品的处理, 酶活单位为 U/g。

1.4 数据处理

实验结果以平均值 \pm 标准偏差表示。采用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析, 通过邓肯检验($P < 0.05$)检测显著性差异, 置信区间为 95%。图表通过 Origin 2024 软件绘制, 所有测量均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同处理对萌发甜荞形态学指标的影响

2.1.1 甜荞萌发期间百粒重分析

甜荞萌发期间百粒重变化如表 1 所示。萌发前中期(0~24 h), 各处理组百粒重随萌发时间显著增加, 从初始约 2.43 g 左右逐步上升至约 4.45 g, 除 HVEF 组在 16~24 h 差异不显著外, 其余 CK、AEW 和 AEW+HVEF 组的组内差异显著($P < 0.05$)。萌发后期(32~40 h), 百粒重缓慢上升并趋于稳定, 组内无显著差异。萌发初期百粒重增加主要源于种子吸水膨胀, 随着萌发进行, 胚乳养分(如淀粉)水解为可溶性糖, 支持胚生长, 导致百粒重持续上升^[27]。此外萌发中期(24 h) AEW+HVEF 联合处理组百粒重高于 CK 组, AEW 与 HVEF 单独处理也略高于 CK 组。这表明 AEW 处理可能通过调节种子细胞膜透性或激活酶活性, 加速营养物质转化(如淀粉水解为可溶性糖), 支持胚生长^[8]。同时电场处理通过影响可能涉及自由基的生化过程和刺激蛋白质和酶的活性来提高种子活力^[24]。在本研究中 AEW+HVEF 联合处理可能通过协同作用进一步增强萌发前中期代谢效率。在萌发后期, 百粒重增长趋于稳定, 这可能是由于种子内营养物质消耗与新组织合成达到平衡, 处理效应被生长阶段的自然规律掩盖。

2.1.2 甜荞萌发期间萌发率分析

甜荞萌发期间萌发率变化如表 2 所示。萌发关键期为 16~24 h, 在 16 h 时各处理组萌发率均显著高于 CK 组, 且联合处理效果最佳为 81.33%, 在 24 h 时萌发率进一步提升, 3 种处理组的甜荞萌发率维持在 90%左右, CK 组仍显著低于处理组($P < 0.05$)。在 32 h 时, 甜荞种子全部发芽, 此时各处理组间无显著差异。从显著性分析角度来看, 联合处理组在 16 h 萌发率最佳, 表明协同效应显著, 此时 HVEF 组与

表 1 甜荞萌发期间百粒重
Table 1 The 100-grain weight of *Fagopyrum esculentum* during germination

萌发时间/h	百粒重/g			
	CK	AEW	HVEF	AEW+HVEF
0	2.42±0.18 ^d	2.45±0.18 ^d	2.43±0.31 ^d	2.44±0.01 ^d
8	3.74±0.12 ^c	3.74±0.05 ^c	3.74±0.05 ^c	3.74±0.12 ^c
16	4.19±0.03 ^b	4.20±0.01 ^b	4.21±0.04 ^b	4.22±0.12 ^b
24	4.42±0.01 ^a	4.46±0.03 ^a	4.44±0.07 ^{ab}	4.49±0.02 ^a
32	4.53±0.08 ^a	4.54±0.13 ^a	4.53±0.02 ^a	4.55±0.06 ^a
40	4.56±0.01 ^a	4.55±0.01 ^a	4.56±0.02 ^a	4.57±0.01 ^a

注: 不同小写字母代表组内差异显著($P<0.05$), 表 3 同。

表 2 甜荞萌发期间萌发率
Table 2 Germination rate of *Fagopyrum esculentum* during germination

萌发时间/h	萌发率/%			
	CK	AEW	HVEF	AEW+HVEF
0	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND
16	69.67±1.20 ^d	74.33±0.33 ^c	78.67±0.67 ^b	81.33±0.67 ^a
24	84.67±1.20 ^b	89.00±0.58 ^a	88.67±0.33 ^a	91.00±0.58 ^a
32	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
40	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a

注: 不同小写字母代表组间差异显著($P<0.05$); ND 表示测量指标未观察到或无法测量, 表 3 同。

AEW 组差异显著($P<0.05$), 说明单独处理中 HVEF 更有效。ZHANG 等^[8]发现 AEW 处理可以通过酸性环境降解种皮纤维素, 促进水分吸收, 缩短萌发时间, 同时 AEW 处理可以调节脱落酸和活性氧, 加速种子的萌发^[14-15]。CHANG 等^[16]的研究显示 HVEF 处理可能通过改变细胞膜电位, 增强透性, 加速营养物质运输, 还可能通过电场刺激胚细胞呼吸作用, 提高代谢速率^[24-25]。AEW+HVEF 联合处理可能通过酸性环境和电场胁迫双重作用, 进一步打破种子休眠, 促进胚的代谢与生长。

2.1.3 甜荞萌发期间芽长分析

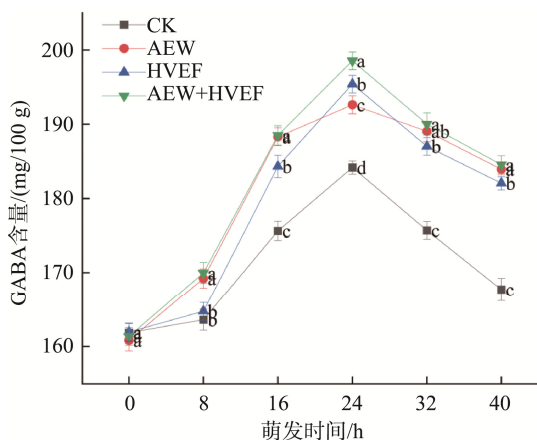
芽长的增长主要是胚根细胞分裂与伸长, 依赖细胞分裂素和生长素的协同作用^[28]。甜荞萌发期间芽长变化如表 3 所示。萌发开始后各组芽长随着萌发时间的增加而增加, 从 16 h 的约 3.06 mm 逐步上升至 40 h 的约 4.73 mm, 组内差异显著, 表明了甜荞萌发过程中丰富的代谢活动。与萌发率相比处理组在萌发率中表现出显著优势, 但芽长无差异, 表明处理可能加速萌发进程(缩短萌发时间), 但对芽的最终长度无显著影响。

2.2 不同处理对萌发甜荞 GABA 的影响

在荞麦萌发过程中 GABA 含量变化如图 1 所示, CK

表 3 甜荞萌发期间芽长
Table 3 Bud length of *Fagopyrum esculentum* during germination

萌发时间/h	芽长/mm			
	CK	AEW	HVEF	AEW+HVEF
0	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND
16	3.06±0.08 ^c	3.06±0.06 ^d	3.12±0.10 ^d	3.10±0.06 ^d
24	3.97±0.06 ^b	4.03±0.12 ^c	4.00±0.05 ^c	4.07±0.12 ^c
32	4.22±0.38 ^b	4.24±0.10 ^b	4.25±0.08 ^b	4.24±0.06 ^b
40	4.73±0.13 ^a	4.77±0.12 ^a	4.73±0.12 ^a	4.77±0.06 ^a



注: 图中不同小写字母表示显著差异($P<0.05$), 下同。

图 1 甜荞萌发过程中 GABA 含量

Fig.1 Content of GABA during the germination process of *Fagopyrum esculentum*

组与各处理组的 GABA 含量均呈现先上升后下降的趋势。0 h 时, 各组 GABA 含量无显著差异; 随着萌发时间推进, 处理组 GABA 含量增速明显快于 CK 组, 尤其在 24 h 时, 各组均达到含量峰值。AEW 组与 HVEF 组在 24 h 时 GABA 含量均高于 CK 组, 但显著低于联合处理组 ($P<0.05$)。其中, HVEF 组在 16~24 h 的增长幅度较 AEW 组更显著, 说明 HVEF 处理对 GABA 积累有一定单独促进作用。在发芽的种子中已经证明 GABA 和酚类化合物的增加^[29-30]。AEW 的处理调节了种子脱落酸和活性氧代谢^[8,15], 同时调节种子细胞膜透性或激活了酶活性^[8]。而 HVEF 通过电场刺激胚细胞呼吸作用, 提高代谢速率^[16,24], 促进了种子的萌发。此外, 在 24 h 时, AEW+HVEF 组 GABA 含量达峰值 $[(198.72±0.75) \text{ mg}/100 \text{ g}]$, 较对照组提高 35.6%, 较 AEW 和 HVEF 处理组分别提高 8.3% 和 6.1%, 显著高于其他组 ($P<0.05$), 这可能是由于 AEW 和 HVEF 的双重胁迫作用, 激活甜荞 GABA 代谢通路。总之, AEW、HVEF 处理均能促进荞麦萌发过程中 GABA 积累, 同时 AEW+HVEF 联合处理存在协同效应, 可显著提升 GABA 峰值含量。

2.3 不同处理对萌发甜荞 GABA 合成相关酶类活性的影响

GAD 是催化谷氨酸脱羧生成 GABA 关键限速酶, 其活性直接影响 GABA 的合成量^[2-3]。如图 2 所示, 在荞麦萌发过程中, 各处理的 GAD 活性, 呈现动态变化。同时各处理组 GABA 含量变化与 GAD 活性趋势具有相关性。HVEF 处理在萌发初期显著激活 GAD 活性但后续波动大; 后期对应其 GABA 含量虽高于 CK 组, 却低于联合处理组。AEW 处理则通过持续提升 GAD 活性, 缓慢促进 GABA 积累。HAO 等^[2]也发现 AEW 处理可以提高 GAD 的活性, 从而导致发芽荞麦的 GABA 积累。在 AEW+HVEF 联合处理下, GAD 活性在萌发过程中维持较高水平, 同期 GABA 含量也达到最高峰值[24 h 时(198.72±0.75) mg/100 g]。这表明, GAD 活性与 GABA 的合成呈正相关, GAD 活性越强, 催化谷氨酸脱羧生成 GABA 的效率越高, 这与 CHEN 等^[4]的研究 GAD 促进 GABA 合成表现一致。

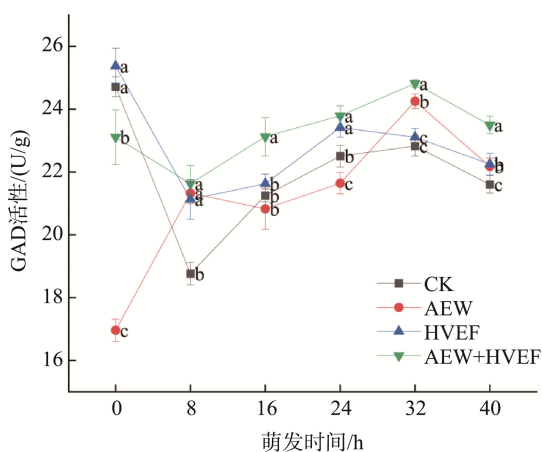


图 2 甜荞萌发过程中 GAD 活性

Fig.2 Activity of GAD during the germination process of *Fagopyrum esculentum*

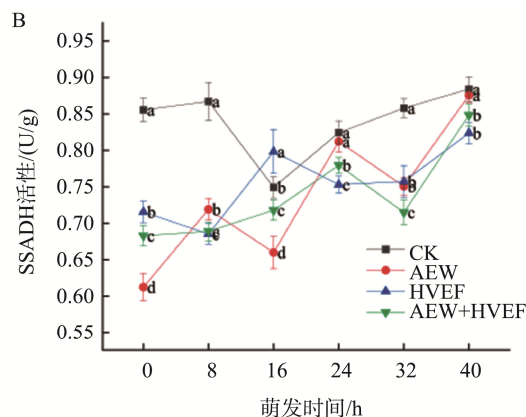
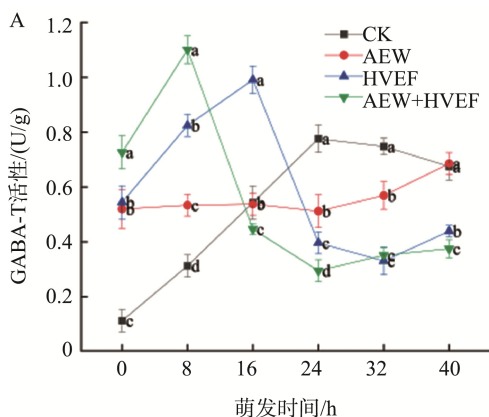


图 3 甜荞萌发过程中 GABA-T (A)、SSADH (B) 活性

Fig.3 Activities of GABA-T (A) and SSADH (B) during the germination process of *Fagopyrum esculentum*

GABA-T 和 SSADH 是 GABA 分解代谢的关键酶^[2]。GABA-T 在 GABA 支路中处于中间环节, 在 GABA 支路中 GABA-T 可以将 GABA 和 α -酮戊二酸催化转氨生成琥珀酸半醛(succinic semialdehyde, SSA)和谷氨酸(glutamic acid, Glu)^[6-7], 生成的 Glu 依然可以参与到 GABA 的合成中去, 产生的 SSA 参与后续 GABA 支路的相关反应^[4,7-8]。最后 SSADH 将 GABA-T 催化得到的 SSA 通过脱氢得到琥珀酸并参与三羧酸循环, 这一过程为植物合成 ATP 提供碳骨架^[5,31]。

GABA-T 活性的变化如图 3A 所示, 萌发初期 CK 组 GABA-T 活性较低, 但随时间延长显著上升, 16 h 后活性持续处于较高水平, 加速 GABA 分解。AEW、HVEF 及联合处理(AEW+HVEF)组对 GABA-T 活性有抑制作用(16 h 后)。AEW+HVEF 组在 0 h 活性较高, 但整体低于 CK 组后期水平; HVEF 组在 16 h 活性达到峰值, 但后续波动下降, 均减少了 GABA 的分解代谢; AEW 组在前中期也表现出了抑制效果。SSADH 酶活性的变化如图 3B 所示, 整体呈现动态变化, CK 组在萌发初期 SSADH 活性较高, 在中后期持续上升, 持续推动 GABA 分解。AEW 组在萌发后期活性升高, 促进了 GABA 分解, 这一现象可能与 AEW 组 GAD 酶在后期活性显著下降有关; HVEF 组的活性波动较大, 整体表现出抑制作用; 联合处理组活性相对维持在较低水平, 抑制了 GABA 分解通路的关键酶, 有利于甜荞 GABA 的积累。SSADH 活性变化不稳定, 呈波动态势, 这是由于其活性不仅受外界理化条件刺激影响, 还取决于作用底物浓度, 高浓度 SSA 会抑制其活性; 此外, 还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸浓度增加也会使其活性降低^[32-33]。

总体来说, 在甜荞萌发进程中, 处理组通过调控 GAD、GABA-T 和 SSADH 活性影响了 GABA 代谢。GAD 作为 GABA 支路代谢的限速酶^[2,4], 处理组能激活其活性, 推动 GABA 合成。GABA-T 催化 GABA 分解^[6,8], 尽管处理组在萌发初期该酶活性较高, 但整体能抑制其活性, 减

少 GABA 的消耗。而 SSADH 可催化 SSA 生成琥珀酸^[4,7], 萌发前期, 处理组能显著抑制 SSADH 活性, 利于 GABA 积累; 在萌发中后期, 植物自身代谢使 SSADH 活性波动上升, 加快 GABA 分解, 导致 GABA 含量降低。整体来看, 处理组通过优化 GABA 合成与分解的代谢平衡, 促进 GABA 积累, 其中 AEW+HVEF 联合处理的效果更为显著。

3 结 论

本研究系统探讨了 AEW、HVEF 及其联合处理对甜荞萌发过程中形态学指标及 GABA 代谢的影响。结果表明, 各处理组在萌发前中期通过不同机制显著加速了种子吸水 and 营养物质转化。在 GABA 代谢调控方面, 联合处理组通过双重胁迫激活了 GAD 酶活性, 同时处理组抑制了 GABA 分解关键酶 GABA-T 和 SSADH 的活性, 尤其在萌发前期有效减少了 GABA 的消耗。其中, HVEF 处理 GAD 的瞬时激活作用显著, 而 AEW 处理则通过持续提升 GAD 活性和抑制 GABA-T 活性, 形成更稳定的促进效果。联合处理组通过协同优化 GABA 合成与分解的代谢平衡, 最终实现 GABA 的高效积累。综上, AEW 与 HVEF 联合处理可作为一种高效的甜荞萌发调控技术, 其机制涉及细胞膜透性调节、酶活性激活及代谢通路优化。该研究为功能性荞麦萌动食品的开发提供了理论依据, 未来可进一步探索处理参数与 GABA 积累的剂量效应关系, 以及联合处理对其他营养成分的影响。

参考文献

- [1] GAO L, VAN-BOCKSTAELE F, HAESAERT G, *et al.* Effects of nitrogen and sulfur fertilizer treatment on the structure and physicochemical properties of resistant starch in buckwheat [J]. *Food Chemistry*, 2025, 477: 143620.
- [2] HAO J, WU T, LI H, *et al.* Dual effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) treatment on the accumulation of γ -aminobutyric acid (GABA) and rutin in germinated buckwheat [J]. *Food Chemistry*, 2016, 201: 87–93.
- [3] XIE Z, XIA S, LE GW. Gamma-aminobutyric acid improves oxidative stress and function of the thyroid in high-fat diet fed mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 8: 76–86.
- [4] CHEN C, LIU X, WANG N, *et al.* Mechanism of γ -aminobutyric acid production from the enzymatic hydrolysis of urea-solubilized glutenin by mung bean sprout juice [J]. *Food Bioscience*, 2025, 66: 106149.
- [5] GENG W, ZHANG Y, LI C, *et al.* Effect of exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) on the growth, photosynthetic pigment, antioxidant and GABA metabolism of *Festuca arundinacea* (tall fescues) under cadmium stress [J]. *Plants-Basel*, 2025, 14(3): 383.
- [6] TESTONE G, SOBOLEV AP, LAMBREVA MD, *et al.* The molecular pathways leading to GABA and lactic acid accumulation in florets of organic broccoli rabe (*Brassica rapa* subsp. *sylvestris*) stored as fresh or as minimally processed product [J]. *Horticulture Research*, 2025, 12(1): uhae274.
- [7] UTAMA GL, SAHAB NRM, NURMILAH S, *et al.* Unveiling microbial dynamics in terasi spontaneous fermentation: Insights into glutamate and GABA production [J]. *Current Research in Food Science*, 2025, 10: 100950.
- [8] ZHANG C, ZHAO Z, YANG G, *et al.* Effect of slightly acidic electrolyzed water on natural Enterobacteriaceae reduction and seed germination in the production of alfalfa sprouts [J]. *Food Microbiology*, 2021, 97: 103414.
- [9] YU Y, LI M, LI C, *et al.* Accelerated accumulation of γ -aminobutyric acid and modifications on its metabolic pathways in black rice grains by germination under cold stress [J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1290.
- [10] YOON YE, KUPPUSAMY S, CHO KM, *et al.* Influence of cold stress on contents of soluble sugars, vitamin C and free amino acids including gamma-aminobutyric acid (GABA) in spinach (*Spinacia oleracea*) [J]. *Food Chemistry*, 2017, 215: 185–92.
- [11] BRIKIS CJ, ZAREI A, CHIU GZ, *et al.* Targeted quantitative profiling of metabolites and gene transcripts associated with 4-aminobutyrate (GABA) in apple fruit stored under multiple abiotic stresses [J]. *Horticulture Research*, 2018, 5: 61.
- [12] WU Q, GUO R, ZHANG W, *et al.* Effects of aminoguanidine on γ -aminobutyric acid accumulation pathways in fresh tea leaves under hypoxic conditions [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55(2): 899–907.
- [13] YU C, ZHU L, ZHANG H, *et al.* Effect of cooking pressure on phenolic compounds, gamma-aminobutyric acid, antioxidant activity and volatile compounds of brown rice [J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 97: 103127.
- [14] RU X, YOU W, ZHANG J, *et al.* γ -aminobutyric acid treatment inhibits browning and promotes storage quality by regulating reactive oxygen species and membrane lipid metabolism in fresh-cut stem lettuce [J]. *Food Chemistry*, 2024, 459: 140420.
- [15] WU X, WU C, BIAN Z, *et al.* Abscisic acid and reactive oxygen species were involved in slightly acidic electrolyzed water-promoted seed germination in watermelon [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 291: 110581.
- [16] CHANG X, LIANG Y, SHI F, *et al.* Biochemistry behind firmness retention of jujube fruit by combined treatment of acidic electrolyzed water and high-voltage electrostatic field [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 19: 100812.
- [17] CHEN Y, XIE H, TANG J, *et al.* Effects of acidic electrolyzed water treatment on storability, quality attributes and nutritive properties of longan fruit during storage [J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126641.
- [18] SUN J, CHEN H, XIE H, *et al.* Acidic electrolyzed water treatment retards softening and retains cell wall polysaccharides in pulp of postharvest fresh longans and its possible mechanism [J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 13: 100265.
- [19] SUN J, JIANG X, CHEN Y, *et al.* Recent trends and applications of electrolyzed oxidizing water in fresh foodstuff preservation and safety

- control [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130873.
- [20] DALVI IM, HAMDAMI N, LE-BAIL A, *et al.* The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review [J]. Food Research International, 2016, 89: 48–62.
- [21] YAN M, YUAN B, XIE Y, *et al.* Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *Agaricus bisporus* in response to high voltage electric field [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 166: 111230.
- [22] LOTFI M, HAMDAMI N, DALVI-ISFAHAN M, *et al.* Effects of high voltage electric field on storage life and antioxidant capacity of whole pomegranate fruit [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102888.
- [23] SALETNIK B, ZAGULA G, SALETNIK A, *et al.* Effect of magnetic and electrical fields on yield, shelf life and quality of fruits [J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 3183.
- [24] KOYAMA S, TAMURA Y, ISHIKAWA G, *et al.* Acceleration of germination and early growth of plant seeds by high frequency and low intensity alternating electric fields [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2021, 14(3): 95–101.
- [25] CHANG X, LIANG Y, GUO T, *et al.* Combined treatment of acidic electrolyzed water and high-voltage electrostatic field improves the storage quality of Huping Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Huping) [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(14): 2762.
- [26] XU W, SONG Z, LUAN X, *et al.* Biological effects of high-voltage electric field treatment of naked oat seeds [J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3829.
- [27] ZHAO M, ZHANG H, YAN H, *et al.* Mobilization and role of starch, protein, and fat reserves during seed germination of six wild grassland species [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 234.
- [28] LIU S, WANG W, LU H, *et al.* New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 187–197.
- [29] KONG L, LIN Y, LIANG J, *et al.* Dynamic changes in vitamin E biosynthesis during germination in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Foods, 2022, 11(20): 3200.
- [30] WU NN, LI R, LI ZJ, *et al.* Effect of germination in the form of paddy rice and brown rice on their phytic acid, GABA, γ -oryzanol, phenolics, flavonoids and antioxidant capacity [J]. Food Research International, 2022, 159: 111603.
- [31] ZHANG G, XU J, WANG Y, *et al.* A multi-omics study revealed the effect of pulsed light treatment on germinated brown rice: Promotion of sprouting efficiency and gamma-aminobutyric acid enrichment [J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104196.
- [32] CLARK SM, DI-LEO R, DHANOA PK, *et al.* Biochemical characterization, mitochondrial localization, expression, and potential functions for an *Arabidopsis gamma*-aminobutyrate transaminase that utilizes both pyruvate and glyoxylate [J]. Journal of experimental botany, 2009, 60(6): 1743–57.
- [33] 李玉梅, 程建新, 葛霞, 等. 弱酸性电解水用于提升鲜切马铃薯安全品质的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 197–205.
- LI YM, CHENG JX, GE X, *et al.* Study on improving the safety quality of fresh-cut potatoes with weak acid electrolytic water [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1): 197–205.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)