DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.07.007

不同处理对青稞脂肪氧化酶活性及品质的影响

刘小娇,白婷,王姗姗,朱明霞,靳玉龙,文华英,张玉红*
(西藏自治区农牧科学院 农产品开发与食品科学研究所,西藏 拉萨 850000)

摘　要:采用常压蒸制、微波、炒制、过热蒸汽4种方式对青稞籽粒进行灭酶处理,研究不同处理对青稞脂肪氧化酶活性及品质的影响。结果显示,在常压蒸制1 min、微波中高火3 min、炒制900 W 5 min、过热蒸汽210 ℃ 1 min条件下,可显著降低青稞脂肪氧化酶的活性,灭酶率均能达到80%左右。不同处理对青稞全粉品质的影响研究表明:灭酶处理使青稞全粉的糊化温度下降,青稞全粉更易于糊化,但峰值黏度、谷黏度和最终黏度提高;使青稞全粉中的损伤淀粉值增加,对面粉的加工品质造成一定影响;能有效降低青稞全粉脂肪酸值,对延长青稞储藏期有一定的作用。可根据在实际中的用途选择不同灭酶方式。

关键词:青稞;脂肪氧化酶;活性;灭酶;品质

Effects of Different Treatments on the Activity of Lipoxygenase and Quality of Highland Barley

LIU Xiao-jiao, BAI Ting, WANG Shan-shan, ZHU Ming-xia, JIN Yu-long, WEN Hua-ying, ZHANG Yu-hong*
(Institute of Food Sciences and Technology, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract: The seeds of highland barley were treated with normal pressure steaming, microwave, stir-frying and superheated steam. The effects of different treatments on the activity of lipoxygenase and quality of highland barley were studied. The results showed that the activity of lipoxygenase of highland barley under the conditions of normal pressure steaming 1 min, microwave high fire 3 min, stir-fried 900 W 5 min and superheated steam 210 ℃ 1 min could be significantly reduced, and the enzyme killing rate was about 80%. The study on the effect of different treatments on the quality of whole highland barley flour showed that the enzyme killing treatment reduced the gelatinization temperature of the whole highland barley flour and made the whole highland barley flour easier to gelatinize, but increased the peak viscosity, grain viscosity and final viscosity. These operations increased the content of damaged starch in whole highland barley flour, which had a certain effect on the processing quality of highland barley flour, but could effectively reduce the content of fatty acid value in whole highland barley flour and prolong the storage life of highland barley. In application, different enzyme killing methods could be selected according to the actual use.

Key words: highland barley; lipoxygenase; activity; enzyme deactivation; quality

引文格式:
刘小娇,白婷,王姗姗,等. 不同处理对青稞脂肪氧化酶活性及品质的影响[J].食品研究与开发, 2021, 42(7):39-44.
LIU Xiaojiao, BAI Ting, WANG Shanshan, et al. Effects of Different Treatments on the Activity of Lipoxygenase and Quality of Highland Barley[J].Food Research and Development, 2021, 42(7):39-44.

基金项目:西藏自治区自然科学基金(XZ2018ZRG-53(Z));西藏自治区科技重大专项(XZ201901NA04)
作者简介:刘小娇(1984—),女(汉),助理研究员,硕士研究生,研究方向:农产品加工。
* 通信作者:张玉红,女,研究员,硕士研究生,研究方向:农产品加工。

青稞是重要的健康食品资源，是我国藏区人民非常喜爱的主食。随着大众对青稞营养和功能认识的逐渐提高，青稞食品市场不断扩大。从营养角度上看，青稞是非常优质的谷物作物，青稞籽粒中总淀粉平均含量为 62.22%，其中支链淀粉为 40.06%，直链淀粉为 22.17%；蛋白质平均含量为 12.18%，高于水稻和玉米[1-2]；含有 17 种氨基酸，包括人体所需的 8 种必需氨基酸[3]，尤其是谷物中普遍缺乏的赖氨酸，含量高达 0.79%[4]；粗脂肪含量平均为 2.10%，低于玉米和燕麦[1,5]；青稞中的 β-葡聚糖平均含量 6.13%，居全球大麦之最[6]，使其具有预防心血管疾病[7]、降血糖[8-9]等显著作用。同时，青稞中还富含黄酮、母育酚、花青素等酚类物质，这些物质可作为天然抗氧化剂，在抗癌、抗衰老和提高免疫力等方面发挥独特的生理功效[10-11]。

脂肪氧化酶（lipoxygenase，Lox）通称脂氧酶，是一类含非血红素铁、不含硫的过氧化物酶，专一催化具有顺、顺-1，4-戊二烯结构的多元不饱和脂肪酸加氧反应，氧化生成具有共轭双键的氢过氧化物，呈球型，可溶，无色，其分子量在动物中为 75 kDa~80 kDa，植物中为 90 kDa~104 kDa，其在动植物和微生物中普遍存在，参与植物的生长发育、衰老、脂质过氧化及其它胁迫反应等，在真核细胞生物中参与不饱和脂肪酸的代谢[12-18]。脂质降解是谷物粮食储藏期间变质、产生陈味劣变的主要内在原因，Lox 参与脂质降解，是影响谷物储藏特性的重要因素之一[19-23]，能导致谷物发生氧化变臭，即不饱和脂肪酸与氧气发生氧化反应形成不理想的风味和气味，并且能影响食品原料的功能[24]，会造成有营养价值的多不饱和脂肪酸损失，产生促使酸败的氧化产物，导致油脂及含油食品在其加工和储藏过程中色、香、味的劣变[25]。低活性 Lox 或 Lox 缺失体可以有效减轻脂质的氧化反应，减轻籽粒的氧化变质，从而延长其储藏期[26]，可见 Lox 是导致稻谷陈化变质的关键酶[27]。因此，在粮食加工过程中控制 Lox 活性具有重要的意义。

目前，我国常用的燕麦脂肪氧化酶灭酶技术主要有传统的炒制灭酶、烘烤灭酶、常压蒸制灭酶，以及新型的红外灭酶和微波灭酶等方式[28-29]。本研究采用常压蒸制、微波、炒制、过热蒸汽 4 种方式对青稞籽粒进行灭酶处理，对不同灭酶方式的参数进行研究，为灭酶技术在青稞食品加工领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

青稞样品为藏青 2000，产于西藏自治区日喀则市；十水合四硼酸钠、无水磷酸氢二钠、无水磷酸二氢钠、硼酸、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、氢氧化钠、乙醇、酚酞、氢氧化钾、苯（以上均为分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；吐温 20：美国 sigma 公司；亚油酸（纯度≥99%）：上海佰晔生物科技有限公司。

1.2 主要仪器设备

电热鼓风干燥箱（DHG-9000）：上海一恒科学仪器有限公司；实验室旋风式粉碎磨（FS-Ⅱ）：浙江托普云农业科技股份有限公司；紫外可见分光光度计（UV1700PC）：上海奥析科学仪器有限公司；多头磁力搅拌器（JB-12）：金坛市康华电子仪器制造厂；电热恒温水浴锅（HWS-28）：上海齐欣科学仪器有限公司；超声波清洗机（XZ-10）：宁波新芝生物科技股份有限公司；冷冻离心机（TGL-16MS）：上海卢湘仪离心机仪器有限公司；pH 酸度计（pH400）：Alalis 公司；电磁炉（G21-RH2153）：美的集团有限公司；微波炉（NN-GM333W）、蒸汽烤箱（NU-SC300B）：松下电器（中国）有限公司；分析天平（BS223S）：Sartorius 公司；快速黏度分析仪（RVA Super 4）：Newport Scientific 公司；智能白度仪（DN-B）：杭州大材光电科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 青稞 Lox 活性的测定

采用紫外分光光度法进行测定，取适量青稞样品用实验室旋风式粉碎磨粉碎，过 40 目筛。准确称取 2.5 g 青稞粉末样品于预冷的烧杯，加入 20 mL pH7.0 的磷酸缓冲液（0.05 mol/L），冰浴磁力搅拌 30 min。在 4 ℃下以 10 000 r/min 离心 10 min，上清液用滤纸过滤，取滤液作为粗酶提取液。测定前，将备用的底物工作液、粗酶提取液以及 pH8.0 硼酸-硼砂缓冲液（0.05 mol/L）在 25 ℃下保温 10 min。测定时，用硼酸-硼砂缓冲液作空白，于 234 nm 下调零，在石英比色皿中依次加入 200 μL（0.004 mmol/L）亚油酸底物和 3 mL pH8.0 硼酸-硼砂缓冲液，并迅速加入 50 μL 粗酶提取液，上下颠倒混匀，立即放入分光光度计中，15 s 后在 234 nm 波长下扫描，记录 2 min 内 *OD* 值的变化。

Lox 活性的计算：在室温（25 ℃）和 0.05 mol/L pH8.0 硼酸-硼砂缓冲液的条件下，以每分钟光密度变化 1 为 1 U 来表示 Lox 活性的大小。单位质量样品中，绝对干物质所含有的酶活性，以 U/g 表示，计算公式如下。

$$\text{Lox 活性/(U/g)}=\frac{\Delta OD_{234\,nm}\times V_2}{\Delta t\times V_1}\times\frac{V_0}{m}$$

式中：Δt 为反应时间，min；V_1 为测定时粗酶液的添加量，mL；V_2 为反应体系总体积，mL；V_0 为粗酶提取液总体积，mL；m 为样品质量，g；$\Delta OD_{234\,nm}$ 为 234 nm 下 Δt 时间内光密度值的变化。

1.3.2 青稞 Lox 灭酶处理

以不灭酶处理的青稞籽粒作为对照组(CK),采取常压蒸制、微波、炒制和过热蒸汽方式进行灭酶。处理前,称取 300 g 青稞籽粒清洗、除杂、烘干,进行润麦(水分调节至 20%),储存 2 h 备用。

常压蒸制灭酶:称取 300 g 样品平摊成 0.5 cm 薄层放在蒸笼中蒸制,开始冒蒸汽时计时,分别处理 0.33、0.67、1、3、5 min,每个梯度重复 3 次。

微波灭酶:称取 300 g 样品,用微波炉低火、中火、中高火分别焙烤 1、2、3、4、5 min,每个梯度重复 3 次。

炒制灭酶:称取 300 g 样品放入电磁炉上的炒锅中 300、600、900 W 炒制 3、5、10、15 min,每个梯度重复 3 次。

过热蒸汽灭酶:每次称取 300 g 样品,过热蒸汽 150、190 ℃分别处理 0.33、0.67、1、2、3、4、5、6 min;过热蒸汽 210 ℃处理 0.5、1、2、3、4、5、6 min,每个梯度重复 3 次。

未灭酶青稞 Lox 活性测定:青稞全粉添加量为 2.5 g,提取溶液为 pH7.0 磷酸缓冲液,冰浴搅拌时间为 30 min,亚油酸底物浓度为 4 mmol/L,反应体系缓冲液为硼酸–硼砂缓冲液(pH8),粗酶液添加量为 50 μL,测量时间为 2 min,进行 3 次重复试验,得到未灭酶青稞 Lox 活性为 107.99 U/g。

将 4 种方式处理后的青稞样品平摊放入干燥箱 35 ℃烘 8 h,烘干后将每个梯度 3 次重复的样品进行混合,混匀后的样品取出 30 g 进行粉碎,制成青稞全粉样品备用,测定脂肪氧化酶活性,确定不同处理方式的最佳灭酶参数。

1.4 灭酶处理对青稞品质的影响

糊化特性按照 GBT 24853—2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速黏度仪法测定》。

损伤淀粉值按照 GB/T 31577—2015《粮油检验 小麦粉损伤淀粉测定 安培计法》。

脂肪酸值按照 GB/T 5510—2011《粮油检验 粮食、油料脂肪酸值测定》。

2 结果与分析

2.1 灭酶处理对 Lox 活性的影响

2.1.1 常压蒸制灭酶

常压蒸制灭酶处理对青稞脂肪氧化酶的灭酶率影响见图 1。

从图 1 可以看出,青稞脂肪氧化酶的活性随着常压蒸制的时间延长而下降,灭酶率升高。常压蒸制 1 min 脂肪氧化酶活性由原来的 107.99 U/g 降至 18.96 U/g,

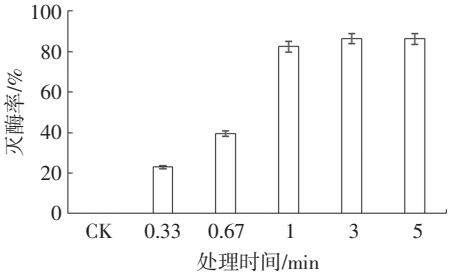

图 1 常压蒸制灭酶处理后青稞脂肪氧化酶的灭酶率

Fig.1 The lipoxygenase extinction rate of highland barley with normal pressure steaming

灭酶率达到 82.44%,随着时间的继续延长,残余脂肪氧化酶活性的降低速率变得缓慢。由此可见常压蒸制灭酶时间应控制在 1 min 以上。

2.1.2 微波灭酶

微波灭酶处理对青稞脂肪氧化酶的灭酶率影响见图2。

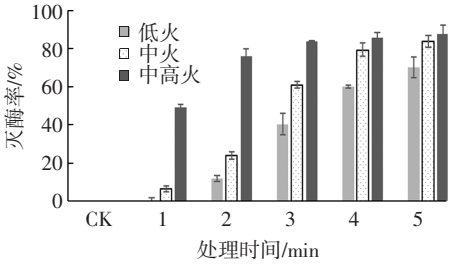

图 2 微波灭酶处理后青稞脂肪氧化酶的灭酶率

Fig.2 The lipoxygenase extinction rate of highland barley with microwave

从图 2 可以看出,随着微波处理时间的延长,青稞 Lox 活性降低,灭酶率升高。微波低火处理 1 min 时,酶活性没有变化,随着时间的延长,酶活性逐渐降低,当微波低火处理 5 min 时,灭酶率达到了 70.22%。微波中火处理 1 min 时,酶活性基本没有变化,灭酶率为6.49%;随着微波中火处理时间的延长,酶活性也急剧下降,当微波中火处理 5 min 时,灭酶率达到了 84.01%。微波中高火处理的效果明显优于微波低火和中火,当微波中高火处理 1 min 时,灭酶率达到了 49.34%,当中高火处理 3 min 时,灭酶率达到了 83.91%,随着时间继续增加,酶活性降低得比较缓慢。因此,微波灭酶的最佳参数为中高火处理 3 min。

2.1.3 炒制灭酶

炒制灭酶处理对青稞脂肪氧化酶的灭酶率影响见图 3。

从图 3 可以看出,炒制功率和炒制时间对灭酶效果的影响较大,随着炒制时间的增加,灭酶率逐渐提升,当灭酶率达到 80%左右时,随着时间的继续增加,

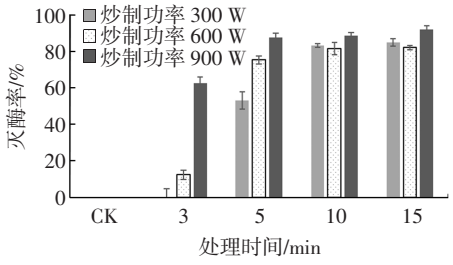

图 3　炒制处理后的青稞脂肪氧化酶灭酶率

Fig.3　The lipoxygenase extinction rate of highland barley with stir-frying

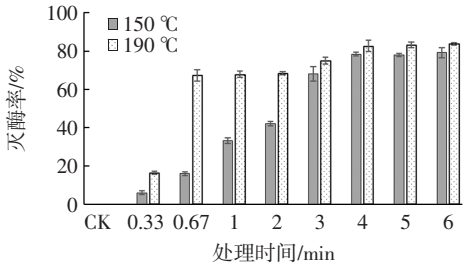

图 4　过热蒸汽 150、190 ℃灭酶处理后的青稞脂肪氧化酶灭酶率

Fig.4　The lipoxygenase extinction rate of highland barley with superheated steam 150 ℃ and superheated steam 190 ℃

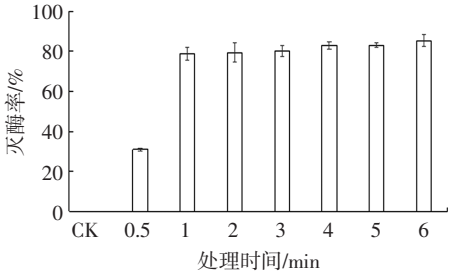

图 5　过热蒸汽 210 ℃灭酶处理后的青稞脂肪氧化酶灭酶率

Fig.5　The lipoxygenase extinction rate of highland barley with superheated steam 210 ℃

酶活性降低得很缓慢。当炒制参数为 300 W 3 min 时，对青稞的 Lox 活性没有任何影响，随着时间的增加，灭酶率逐渐提升，当 300 W10 min 时，Lox 活性降到了 18.05 U/g，灭酶率为 83.29%。当炒制参数为 600 W 3 min 时，Lox 活性的灭酶率仅为 12.33%，600 W 5 min 时，灭酶率达到了 75%，600 W 10 min 时灭酶率为 81.46%；当炒制参数为 900 W 3 min 时，灭酶率为 62.59%，900 W 5 min 时，灭酶率已经达到了 87.75%，随着炒制时间延长，酶活性降低得很慢。由此可以得出，炒制灭酶的最佳参数为 900 W 5 min。

2.1.4　过热蒸汽灭酶

过热蒸汽灭酶处理对青稞脂肪氧化酶的灭酶率影响见图 4、图 5。

从图 4 和图 5 可以看出，过热蒸汽温度和处理时间对灭酶效果的影响很大，随着温度或时间的增加，灭酶率逐渐提升，当灭酶率达到 70%以上时，随着时间的继续增加，酶活性降低得很缓慢。当过热蒸汽 150 ℃ 4 min 时，灭酶率为 78.40%；当过热蒸汽 190 ℃ 3 min 时，灭酶率为 75.02%；当过热蒸汽 210 ℃ 1 min 时，灭酶率为 78.79%。过热蒸汽 150 ℃时，Lox 活性呈现缓慢的下降过程；过热蒸汽 190 ℃时，Lox 活性呈现急剧下降、再缓慢下降的过程，最后趋于平缓；过热蒸汽 210 ℃时，Lox 活性呈现急剧下降趋势，然后趋于平缓。由此可以得出，过热蒸汽的最佳灭酶参数为 210 ℃ 1 min。

2.2　不同处理对青稞品质的影响

2.2.1　不同处理对青稞全粉糊化特性的影响

淀粉在糊化过程中会呈现出黏度随温度变化的特有性质，淀粉的黏度表示淀粉糊的抗流动性，淀粉糊化时黏度的变化是评价淀粉糊化的重要特性。不同灭酶处理条件下青稞全粉糊化性质见表 1。

从表 1 可以看出，与未处理的青稞相比，常压蒸制、炒制、微波、过热蒸汽都能使青稞全粉的峰值黏度、谷黏度、最终黏度、糊化时间有不同程度增加，糊化温度有不同程度的减小；常压蒸制和炒制使得崩溃值有不同程度的降低，过热蒸汽和微波使得崩溃值有所增加，除了过热蒸汽，其它的灭酶处理使得回生值有所上升。淀粉糊化性质受直链淀粉含量、脂类物质含量以及支链淀粉侧链长度的影响，直链淀粉和脂类会抑制淀粉颗粒膨胀并维持淀粉颗粒的完整性[30]，随着灭

表 1　不同灭酶处理条件下青稞全粉糊化性质

Table 1　Gelatinizing properties of whole highland barley flour with different treatment

处理方式	峰值黏度/(Pa·s)	谷黏度/(Pa·s)	崩溃值/(Pa·s)	最终黏度/(Pa·s)	回生值/(Pa·s)	糊化时间/min	糊化温度/℃
CK	3560.33±89.92^{d}	2195.00±82.6^{f}	1365.33±42.19^{ab}	3994.67±62.56^{f}	1799.33±72.28^{c}	5.87±0.08^{d}	79.95±0.98^{a}
常压蒸制 1 min	4484.67±98.57^{b}	3231±93.21^{bc}	1253.67±9.3^{c}	5455.33±36.56^{b}	2224.33±63^{a}	6.31±0.03^{ab}	78.82±0.49^{ab}
炒制 900 W 5 min	4470.00±59.3^{b}	3307±87.54^{b}	1163±28.79^{d}	5352.67±25.42^{c}	2045.67±62.23^{b}	6.42±0.04^{a}	78.92±1.82^{ab}
过热蒸汽 210 ℃1 min	3982.67±35.1^{c}	2540.67±49.17^{d}	1442.00±15^{a}	4223.33±32.01^{e}	1682.67±17.62^{c}	6.15±0.04^{c}	78.02±0.53^{ab}
微波中高火 3 min	4663.67±60.05^{a}	3294±92.96^{b}	1369.67±37.22^{ab}	5425.67±72.28^{bc}	2131.67±32.39^{ab}	6.31±0.03^{ab}	74.78±2.61^{c}

注：同列不同小写字母表示差异显著，P<0.05。

酶温度上升,脂质与蛋白质之间结合力减弱,脂类转向与淀粉结合,油脂会渗透到淀粉分子内部并与其中的直链淀粉分子形成复合物,而这种复合物会显著降低淀粉颗粒的膨胀性，从而使青稞全粉的峰值黏度、谷黏度和最终黏度有所提高。

2.2.2　不同灭酶处理对青稞全粉损伤淀粉值的影响

不同灭酶处理对青稞全粉损伤淀粉值的影响见图6。

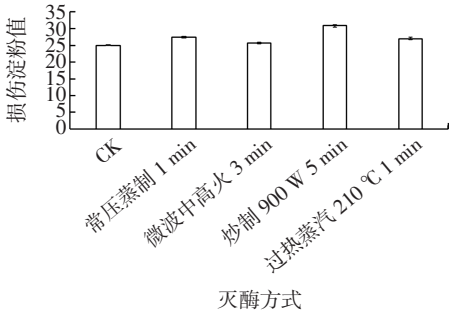

图 6　不同灭酶处理对青稞全粉损伤淀粉值的影响

Fig.6　Effects of damaged starch value of whole highland barley flour with different treatment

未灭酶青稞全粉的损伤淀粉值为 25.05，由图 6 可以看出,灭酶处理会使青稞全粉的损伤淀粉值增加,增幅为 2.20%~28.93%，其中炒制灭酶处理的影响最大,使得损伤淀粉值增加了 28.93%,这是由于在灭酶过程中,水和热的作用使小麦粉中淀粉颗粒结晶区破坏重组,导致损伤淀粉值增高。损伤淀粉值的增加会对面粉的加工品质造成一定影响,如损伤淀粉易吸水膨胀,损伤淀粉越多则吸水率越高,易粘手等,影响加工工艺和食用品质[31-32]。

2.2.3　不同灭酶处理对青稞全粉脂肪酸值的影响

脂肪酸值是检验粮食中游离脂肪酸含量多少的指标，脂肪酸值的变化反映了粮食的品质劣变程度[33-34]。不同灭酶处理对青稞全粉的脂肪酸值的影响见图 7。

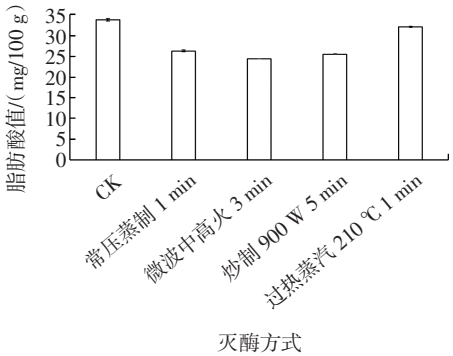

图 7　不同灭酶处理对青稞全粉的脂肪酸值的影响

Fig.7　Effects of fatty acid values of whole highland barley flour with different treatment

从图 7 可以看出，经过灭酶处理后的青稞全粉脂肪酸值均有不同程度的降低，降幅为 5.00%~28.06%，其中微波处理后的脂肪酸值降低幅度最大，达到了 28.06%。由此可见灭酶处理在有效降低脂肪氧化酶活性的同时,也能有效降低脂肪酸值,可以推断出灭酶对延长青稞储藏期有一定的积极作用。

3　结论

常压蒸制 1 min、微波中高火 3 min、炒制 900 W 5 min、过热蒸汽 210 ℃ 1 min,这 4 种灭酶处理方式均能有效降低青稞脂肪氧化酶的活性;使青稞全粉的糊化温度下降,使其更易于糊化,但峰值黏度、谷黏度和最终黏度提高；使青稞全粉中的损伤淀粉值增加,对面粉的加工品质造成一定影响;能有效降低青稞全粉的脂肪酸值,对延长青稞储藏期有一定的作用。应根据在实际中的用途选择不同的灭酶方式。青稞脂肪氧化酶的研究相对于其它谷物的研究较少,虽然灭酶处理能有效降低脂肪氧化酶的活性,但是未达到全部灭活，下一步的研究应考虑将多种灭酶处理结合使用,达到更佳的灭酶效果。

参考文献:

[1] 白婷,靳玉龙,朱明霞,等.56 份青藏高原不同区域青稞籽粒营养品质综合评价[J]. 食品工业科技,2018,39(23):318-322,328.

[2] 徐菲,党斌,杨希娟,等.不同青稞品种的营养品质评价[J]. 麦类作物学报,2016,36(9):1249-1257.

[3] 侯殿志,沈群.我国 29 种青稞的营养及功能组分分析[J].中国食品学报,2020,20(2):289-298.

[4] 王恒良. 西藏青稞资源利用评价及其青稞提取物 β-葡聚糖的生理功效研究[D]. 拉萨：西藏大学, 2008.

[5] 郑俊. 燕麦、青稞营养组分、蛋白和多酚理化性质分析及加工方式对燕麦粉品质影响研究[D]. 南昌：南昌大学, 2016.

[6] CHENG D, ZHANG X, MENG M, et al. Inhibitory effect on HT-29 colon cancer cells of a water-soluble polysaccharide obtained from highland barley[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92:88-95.

[7] 王倩倩,李明泽,陆红佳,等.不同加工方式对青稞降脂益肠功效的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(13):276-280.

[8] CHILLO S, RANAWANA D V, PRATT M, et al.Glycemic response and glycemic index of *Semolina spaghetti* enriched with barley β-glucan[J]. Nutrition,2011, 27(6):653-658.

[9] EZATAGHA A. Glycemic effect of oat and barleybeta-glucan when incorporated into a snack bar:adose escalation study [J]. Journal of the American College of Nutrition, 2014, 33(6): 442-449.

[10] SKERGET M, KOTNIK P, HADOLIN M, et al. pHenols, proanthocyanidins, flavones and flavonols in some plant materials and their antioxidant activities[J]. Food Chemistry, 2005, 89(2): 191-198.

[11] HIRVONEN T, VIRTAMO J, KORHONEN P, et al. Flavonol and flavone intake and the risk of cancer in male smokers(Finland)[J]. Cancer Causes & Control, 2001, 12(9):797–802.

[12] 左进华, 董海洲. 大豆脂肪氧化酶研究现状[J]. 粮食与油脂, 2007(9):1–3.

[13] 司彩霞, 张彩英, 马峙英, 等. 大豆种子脂肪氧化酶研究进展[J]. 河北农业科学, 2005, 9(2): 82–87.

[14] FEUSSNERI,WASTERNACKC.The lipoxygenase pathway[J].Annual Review of Plant Biology,2002, 53(1):275–297.

[15] 刘博,卫玲,肖俊红,等.大豆脂肪氧化酶研究进展[J].山西农业科学,2018,46(2):303–305.

[16] 谢鸿光,许惠滨,潘丽燕,等.植物脂肪氧化酶的特性与功能[J].福建稻麦科技,2019,37(1):56–60.

[17] 邢竺静,李笑梅,赵廉诚,等.大豆萌发期脂肪氧化酶与脲酶活性变化及钝化方法效果评价[J].食品研究与开发,2020,41(1):14–19.

[18] 曾祥博. 不同脂肪氧化酶缺失型大豆制备豆浆中挥发性组分及其中间产物比较和分析[D].吉林:吉林农业大学,2019.

[19] 谢宏.稻米储藏陈化作用机理及调控的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2007.

[20] WANG Linfeng, FLORES Rolando A. The effects of storage on flour quality and baking performance[J]. Food Reviews International,1999, 15(2):215–234.

[21] TAKANO K. Advances in chemistry and technology in Japan[J]. Cereal Foods World, 1993, 38: 695– 698.

[22] 王丽群,孟庆虹,张志宏,等.稻米中脂肪氧化酶分布及其在贮藏期间的变化[J].食品与机械,2016,32(7):103–105, 170.

[23] 温雪瓶,马浩然,严俊波,等.谷物粉贮藏过程中主要成分的变化规律及其相关性分析[J].粮食与油脂,2016(29):49–52.

[24] 李兴军. 谷物脂氧合酶的生理生化特性[J].粮食科技与经济,2011, 36(3):34–37,41.

[25] 闫静芳,王红霞,郭玉鑫,等.脂肪氧合酶的研究及应用进展[J].食品安全质量检测学报,2013,4(3):799–805.

[26] 郑文寅, 姚大年, 张文明. 脂肪氧化酶及其在小麦品质改良中的研究与应用[J]. 粮食与饲料工业, 2008(8): 5–7.

[27] GARDNER H W, GROVE. Soybean Hpoxygenase–l oxidizes 3Z–nonenal [J].Plant pHysiology, 1998(116): 1359–1366.

[28] CAO R G, REN C Z, LI Z G. The effects of different inactivation treatments on the storage properties and sensory quality of naked oat [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(5): 1853–1859.

[29] ARTS I C W,HOLLMAN P C H. PolypHenols and disease risk in epidemiologic studies[J]. The American Journal of Clinical Nutrition,2005, 81(1):317–325.

[30] 刘文胜,胡新中,徐超,等.不同灭酶处理对燕麦粉品质的影响[J].麦类作物学报,2010,30(3):564–567.

[31] 李静. 不同损伤程度小麦淀粉糊化性质差异机理研究[D]. 无锡:江南大学,2016.

[32] 李明菲. 不同热处理方式对小麦粉特性影响研究[D]. 郑州:河南工业大学,2016.

[33] 王涛,王文鹏,吴晓云.小麦粉中脂肪酸值测定提取条件优化[J].食品安全质量检测学报,2019,10(19):6696–6699.

[34] 韩思萌,刘昆仑,陈复生,等.干热处理对米糠储藏期脂肪酸、过氧化值及丙二醛变化的影响[J].食品研究与开发,2020,41(7):31–36.

加工编辑:王艳

收稿日期:2020–06–12