徐敏, 颜志祥, 万羽, 等. 基于脂质组学研究青稞粉在贮藏过程中的脂质变化 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 400−409. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070083

XU Min, YAN Zhixiang, WAN Yu, et al. Lipid Changes in Barley Flour During Storage Based on Lipidomics Research[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 400−409. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070083

· 贮运保鲜 ·

基于脂质组学研究青稞粉在贮藏过程中的脂质变化

徐　敏[1], 颜志祥[1], 万　羽[1], 邹　亮[1,2], 胡一晨[1,*]

（1.成都大学食品与生物工程学院, 农业农村部杂粮加工重点实验室, 四川成都 610106;
2.成都农业科技职业学院, 四川成都 611130）

摘　要: 目的：探究青稞粉贮藏期间的脂质变化，脂质与脂肪酶活性的氧化规律及其相互作用，阐明其氧化劣变的反应机理。方法：通过测定在高温高湿（high-temperature/high-humidity，HH）、常温常湿（normal-temperature/normal-humidity，NN）、低温低湿（low-temperature/low-humidity，LL）贮藏 28 d 青稞粉的脂肪酸含量、脂肪酶活性及丙二醛值来评价其氧化稳定性，采用超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法（ultra-performanceliquid chromatography-quadrupole/electrostatic field orbitrap high-resolution mass spectrometry，UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS）监测脂质组成变化。结果：在 LL 和 NN 条件下，脂肪酸值、脂肪酶活性及丙二醛值的变化较为缓慢；在 HH 条件下贮藏 28 d，脂肪酸值从 91.08±1.33 mg/100 g 升高至 136.26±2.62 mg/100 g，脂肪酶活性从 41.04±0.58 mg/g 升高至 47.91±0.61 mg/g，丙二醛值从 45.41±2.10 nmol/g 升高至 79.97±1.37 nmol/g。通过脂质组学技术共鉴定出 234 种脂质的 23 个亚类，其中包括 176 种具有显著差异的脂质分子。通过相关性分析，发现脂肪酶活性与甾醇脂类 STs、脂肪酰类 FAs、甘油脂类 GLs 存在正相关。主成分分析（Principal component analysis，PCA）和正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA）表明，HH 条件下的青稞脂质随储存时间延长发生显著变化，其中甘油三酯（triglycerides，TG）和甘油二酯（diglycerides，DG）最易氧化，可作为区分新鲜青稞与氧化青稞的标志物。结论：贮藏前后的青稞粉脂质存在明显差异，可以通过降低脂肪酶活性来提高青稞的贮藏稳定性，为制定青稞保质期提供了理论依据。

关键词: 青稞粉, 脂肪酶, 贮藏氧化, 脂质组学, 超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道离子阱联用质谱

中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0400−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070083

本文网刊:

Lipid Changes in Barley Flour During Storage Based on Lipidomics Research

XU Min[1], YAN Zhixiang[1], WAN Yu[1], ZOU Liang[1,2], HU Yichen[1,*]

（1.Key Laboratory of Coarse Cereal Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, School of Food and BiologicalEngineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
2.Chengdu Agricultural College, Chengdu 611130, China）

Abstract: Objective: To investigate lipid changes during the storage of barley flour, the oxidative patterns of lipids and lipase activity, and their interactions, thereby elucidating the reaction mechanisms underlying oxidative deterioration. Methods: Oxidative stability was evaluated by measuring fatty acid content, lipase activity, and malondialdehyde (MDA) value in barley flour stored for 28 days under high-temperature/high-humidity (HH), normal-temperature/normal-humidity (NN), and low-temperature/low-humidity (LL) conditions. Lipid composition changes were monitored using ultra-performance liquid chromatography-quadrupole/electrostatic field orbitrap high-resolution mass spectrometry (UPLC-Q-Exactive Orbi-

收稿日期: 2025−07−08

基金项目: 四川杂粮创新团队（SCCXTD-2024-20）;“兴辽英才计划”带土移植项目（XLYC2204013）;凉山州科技计划项目（24YYYJ0082）。

作者简介: 徐敏（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1433392622@qq.com。

*** 通信作者:** 胡一晨（1987−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品功能营养因子评价与分析, E-mail: huyichen@cdu.edu.cn。

trap MS/MS) to monitor lipid composition changes. Results: Under LL and NN conditions, changes in fatty acid value, lipase activity, and malondialdehyde value were relatively slow; After 28 days of storage under HH conditions, the fatty acid value increased from 91.08±1.33 mg/100 g to 136.26±2.62 mg/100 g, lipase activity rose from 41.04±0.58 mg/g to 47.91±0.61 mg/g, and malondialdehyde value increased from 45.41±2.10 nmol/g to 79.97±1.37 nmol/g. Lipidomics analysis identified 234 lipid molecules across 23 subclasses, including 176 significantly altered lipids. Correlation analysis revealed positive correlations between lipase activity and sterol lipids (STs), fatty acids (FAs), and glycerolipids (GLs). Principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) indicated that barley lipids under HH conditions underwent significant changes with prolonged storage. Among these, triglycerides (TG) and diglycerides (DG) exhibited the highest susceptibility to oxidation and could serve as biomarkers distinguishing fresh barley from oxidized barley. Conclusion: Significant differences exist in barley flour lipids before and after storage. Enhancing storage stability by reducing lipase activity provides a theoretical basis for establishing barley shelf-life standards.

Key words: barley flour; lipase; storage oxidation; lipidomics; ultra performance liquid chromatography coupled with Q-exactive mass spectrometry (UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS)

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum*hook. f)在分类学上属于禾本科小麦属，是寒冷和高海拔地区的主要谷类作物。依据种类可细分为有壳大麦、无壳大麦，以及高原大麦。青稞具有高蛋白、高纤维、高维生素和低脂肪、低糖的特点，符合现代“三高两低”的饮食结构需求[1]。与其他谷类作物相比，青稞含有更多的蛋白质和不饱和脂肪酸，如亚油酸、亚麻酸和油酸[2−3]。青稞中的粗脂质含量约为 1.18%~3.09%，平均为 2.13%，低于玉米、高粱和燕麦。据报道，青稞富含不饱和脂肪酸，具有多种有益健康的生理功能，如抗炎、降低胆固醇及预防心血管疾病等，有助于降低慢性病和代谢性疾病的风险[4]。此外，其麸皮中的主要脂肪酸能作为混合型抑制剂作用于 α-葡萄糖苷酶，表现出降血糖效果，具备开发为 α-葡萄糖苷酶抑制剂的潜力[5]。此外，青稞富含的其他营养成分如 β-葡聚糖、阿拉伯木聚糖和多酚发挥了抗菌、抗氧化和抗肿瘤的能力[6]。青稞的这些营养特性高度契合现代人的膳食需求，随着生活水平的不断提高，它作为一种健康食品原料正日益受到重视和推广[7]。

然而，青稞产后损失严重，陈化是造成其品质降低的主要原因。粮食在贮藏过程中，随着贮藏时间的增加和贮藏条件的变化，谷物的陈化程度不同，脂类也有不同程度的水解。温度与湿度是调控脂肪酶活性与脂质氧化过程的两个最关键环境因子。李尤好等[8] 的研究指出，高温会直接增强脂肪酶活性并加速氧化反应；而石彬等[9] 的发现进一步揭示，高温和高湿度均会加速薏仁米不饱和脂肪酸的水解酸败，而高湿环境在高温基础上的介入，会通过促进不饱和脂肪酸的水解，为氧化提供更多底物，从而共同加速并加剧整体的酸败进程。脂类比淀粉和蛋白质更容易引起谷物的陈化变质，导致谷物食用品质的下降，因而谷物脂类与贮藏关系的研究一直受到学者的关注[10]。扎桑等[4] 通过脂质组学比较了 7 个青稞品种贮藏前后的脂质变化，发现脂质组成基本相似(均含 174 种脂质，以甘油三酯、磷脂酰胆碱、脂肪酸为主)，但贮藏后脂质变化幅度略有不同：脂肪酸含量普遍上升，甘油三酯、双半乳糖甘油二酯等下降。然而，多品种混合分析无法解析青稞的脂质降解途径，因此，深入研究同一品种青稞贮藏后的脂质变化十分有必要。

在粮食贮藏中，脂类变化是衡量陈化程度的重要指标，其酸败主要通过酶促水解、酶促氧化及非酶氧化三种途径发生[11]。脂肪酶催化的脂质水解常启动谷物脂质的氧化劣变过程，产生游离脂肪酸。这些游离脂肪酸可进一步氧化，形成多种初级和次级氧化产物。该过程不仅导致谷物风味劣变和色泽异常，还会破坏类胡萝卜素、植物甾醇、多不饱和脂肪酸等亲脂性活性成分[12]，进而降低谷物及其制品的感官品质、营养价值和经济效益[13]。同时，脂肪过氧化还可能产生过氧化物和有害的醛酮，这不仅可能导致产品质量下降，还可能给人类健康带来潜在风险。

青稞中富含的脂肪酸对人体健康大有益处，但基于脂质组学对青稞脂质的研究却十分有限。基于此，本研究旨在评估青稞粉的储存稳定性，并全面了解其脂质组成及储存期间脂质组分的变化。本研究制备了三种不同储存条件下的青稞粉样品：LL(低温低湿条件)、NN(常温常湿条件)和 HH(高温高湿条件)。首先，通过脂肪酸含量、脂肪酶活性、丙二醛值来评估氧化稳定性。其次，利用超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱(UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS)技术鉴定青稞的脂质组成，并实时追踪贮藏过程中脂质的动态变化与脂肪酶活性的关联。最后，通过多元统计分析探究青稞粉在贮藏过程中的脂质差异，为延缓青稞品质劣变提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜青稞种子(CDU 63)　收获季节采摘于成都大学简阳实验基地(30°19′11.9″N, 104°33′15.31″E)。收集的样品经脱壳，清洗和 40 ℃ 低温烘干后，研磨成粉末并通过 50 目筛以备后期贮藏实验；丙二醛(MDA)试剂盒(A003-3-1)　南京建成生物工程研究所；乙腈(ACN)、甲醇(MeOH)　色谱纯，均购自成

都科龙化学试剂有限公司; 异丙醇(IPA)、甲基叔丁基醚(MTBE)、乙酸铵(>99.0%) 色谱纯, 购自上海阿拉丁生化科技有限公司; 所有内标物(货号: 330731-1EA) 包括三酰甘油(d_7-TG-15:0/18:1, 55 μg·mL^{-1})、二酰甘油(d_7-DG-15:0/18:1, 12 μg·mL^{-1})、磷脂酰胆碱(d_7-PC-15:0/18:1, 160 μg·mL^{-1})、磷脂酰乙醇胺(d_7-PE-15: 0/18:1, 5 μg·mL^{-1})、磷脂酰丝氨酸(d_7-PS-15:0/18:1, 8 μg·mL^{-1})、磷脂酰肌醇(d_7-PI-15:0/18:1, 8 μg·mL^{-1})、胆固醇酯(CE-18:1, 350 μg·mL^{-1})、鞘磷脂(d_9-SM-d18:1/18:0, 30 μg·mL^{-1})、溶血磷脂酰乙醇胺(d_7-Lyso PE-18:1, 0. 5 μg·mL^{-1})、溶血磷脂酰胆碱(d_7-Lyso PC-18:1, 25 μg·mL^{-1}), 阿凡提极地脂质公司(美国)。混合内标物在−20 ℃ 下保存, 直至进一步使用; 其他所用试剂均为国产分析纯。

BGZ-140 热风干燥箱 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; H2050R 离心机 湘潭湘仪仪器有限公司; Biotek Synergy HTX 酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; SB-800DTD 超声波清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司; CPA225D 型电子分析天平 德国赛多利斯; DZKW-S-4 电热恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器有限公司; UPHW-IV-90T 超纯水机 四川优普超纯科技有限公司; RE-52AA 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; Q Exactive Focus 组合型 Orbitrap 高分辨液质联用仪 赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 青稞粉贮藏实验设计 将青稞粉装入三个无色透明的聚乙烯袋中, 分别在低温低湿(LL, 5±2 ℃, 相对湿度 50%±2%)、常温常湿(NN, 25±2 ℃, 相对湿度 65%±2%)和高温高湿(HH, 40±2 ℃, 相对湿度 80%±2%)三个培养箱中贮藏 28 d。然后, 每隔 7 d 收集一次氧化青稞粉样品(0、LL7、LL14、LL21、LL28、NN7、NN14、NN21、NN28、HH7、HH14、HH21、HH28), 并将其装入无色透明的聚乙烯袋中, 置于−80 ℃ 冰箱直至进一步分析。

1.2.2 青稞粉贮藏期间指标的测定 脂肪酸值和脂肪酶活性测定分别按照 GB/T 15684-2015《谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定》和 GB/T 5523-2008《粮油检验 粮食、油料的脂肪酶活动度的测定》进行测定; 丙二醛(Malondialdehyde, MDA)的测定参照丙二醛试剂盒的方法测定。

1.2.3 基于 UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS 的脂质组成及其变化分析

1.2.3.1 样品前处理与质量控制 在 50 mL 离心管中加入 2.0 g 青稞粉和 25 mL MeOH/MTBE(1∶3, v/v), 涡旋 1 min。混匀后在 4 ℃ 下超声 20 min, 再以 5000 r/min 的转速离心 20 min, 然后收集上清液于 25 ℃ 下真空浓缩得到脂质提取物。用 $CHCl_3$/MeOH(1∶1, v/v)配制含 2% 混合标准液的脂质内标液, 再将提取的脂质重悬于 5 mL 的脂质内标液, 然后在 4 ℃ 下以 10000 r/min 的转速离心 10 min, 取上清液过 0.22 μm 的有机滤膜[14]。

为了实时监测系统的稳定性和评估数据质量, 将等量的样品混合, 制备质量控制样品(QC 样品), 质控样品每 9 个样品注入一次。

1.2.3.2 UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS 条件 使用 UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS 分析青稞粉的脂质组成。色谱分离采用 ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱(2.1×50 mm, 1.8 μm)。流动相 A 为 H_2O/MeOH/ACN 混合溶剂(1∶1∶1, v/v/v), 流动相 B 为含有 5 mmol/L 乙酸铵的 IPA/ACN 混合溶剂(5∶1, v/v)。液相梯度设置为: 0~0.5 min, 20% B; 0.5~1.5 min, 20%~40% B; 1.5~3 min, 40%~60% B; 3~16 min, 60%~95% B; 16~16.1 min, 回到 20% B; 在 20% B 下保持 7 min。色谱柱温度为 35 ℃。进样量为 2 μL, 流速为 0.3 mL·min^{-1}[15]。

扫描模式为 Full MS/dd-MS^2, Full MS 分辨率为 70000, dd-MS^2 分辨率为 17500, 在正、负离子模式下进行。质谱条件如下: 喷雾电压 3.5 kV, 鞘层气体流速 35 Arb, 辅助气体流速 10 Arb, 干燥气体温度 350 ℃, 毛细管温度 320 ℃, 质量范围 m/z 200~1200, 碰撞能量分别为 10、30 和 50 eV[16]。

1.2.3.3 脂质鉴定和数据分析 采用以下化合物定性分析方法对青稞脂质成分进行定性分析。使用精确质量测量(<5 ppm)、MS/MS 片段、LC 保留时间和化合物数据库查询来鉴定脂质。在 LipidSearch™ 软件、MS-DAIL 软件和 LIPIDMAPS 中的多个数据库中查询脂质。

化合物的定量分析使用 Xcalibur 4.1 分析 UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS 原始数据。Compound Discover™ 3.1 用于根据保留时间和 m/z 检测和挑选化合物峰。然后将质谱中各信号的峰面积与内标物峰面积进行比较, 从而确定各成分的相对定量信息[17]。

1.3 数据处理

每个实验的结果均以平均值±标准差(SD)表示, 每个实验一式三份。在 SPSS 22.0 中使用双尾 t 检验和方差分析来检验脂肪酶活性、FA 和 MDA 值的统计学意义。当 P<0.05 时, 结果具有统计学意义。多变量分析包括主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘法判别分析(Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA), 均由 SIMCA 14.1 (Umetrics, Umea, Sweden)进行帕累托缩放处理后进行。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间的氧化稳定性

长期以来, 脂质氧化被视为食品脂质变质的关

键途径。在青稞制粉过程中，机械力破坏细胞结构，使内源脂质酶（如脂氧合酶、脂肪酶）与脂质底物接触，引发级联氧化反应，包括不饱和脂肪酸的自由基链式氧化和挥发性醛酮产物的积累。该过程导致必需脂肪酸降解、脂溶性维生素损失及氧化酸败，不仅降低产品营养品质，其促氧化产物还会加剧贮藏期间脂质水解与氧化稳定性下降。因此，通过测定贮藏过程中的 FA 值、脂肪酶活性和 MDA 值来评估青稞粉的贮藏稳定性。其中，FA 值通常用于测量脂质水解程度，脂肪酶是脂质水解过程中的关键酶，MDA 值用于测量青稞粉的氧化程度。

在贮藏过程中，青稞中的脂肪会被脂肪酶水解为脂肪酸，导致脂肪酸增加。因此，脂肪酸值是评价

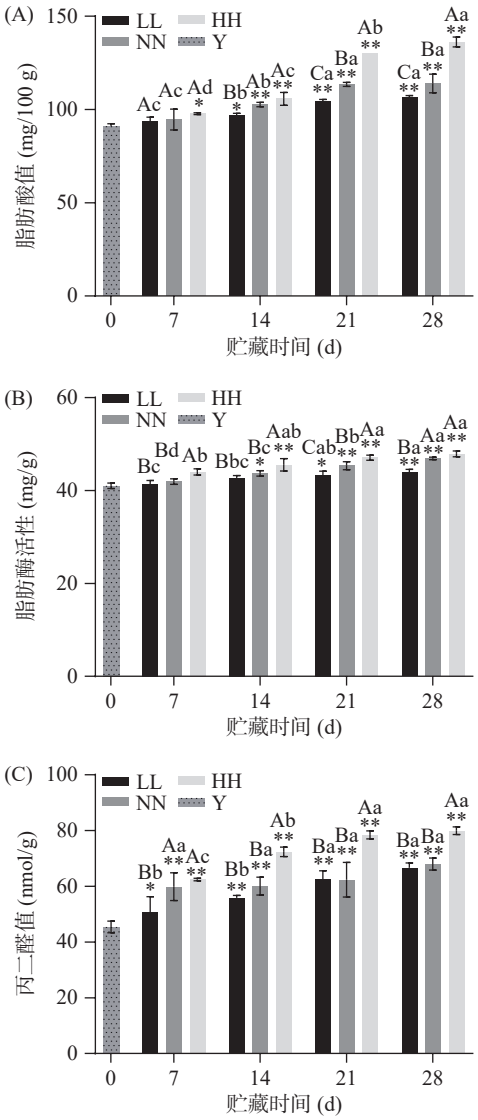


图 1　不同处理下青稞粉的脂肪酸值（A）、脂肪酶活性（B）和丙二醛值（C）

Fig.1　Fatty acid value (A), lipase activity (B) and malondialdehyde value (C) of barley flour with different treatments

注：所有样品与 0 d 之间的显著性差异以*P<0.05，**P<0.01 表示；在相同贮藏时间，不同贮藏条件下样品之间的显著差异（P<0.05）分别以不同大写英文字母表示；在相同贮藏条件，不同贮藏时间下样品之间的显著差异（P<0.05）分别以不同小写字母表示。

脂质水解酸败程度的重要指标之一，同时脂肪酸值的增加对后续的脂质氧化也有重要影响[18]。如图 1（A）所示，LL、NN 和 HH 条件下贮藏 7 d 的青稞粉脂肪酸值并没有显著性差异，而贮藏 28 d 后，与 LL 和 NN 条件相比，HH 条件下的青稞粉的脂肪酸含量从 91.08±1.33 mg/100 g 显著增加至 132.26±2.26 mg/100 g（P<0.05）。具体而言，LL 和 NN 条件下的脂肪酸值分别比 HH 条件下低 28.09% 和 19.56%。该结果说明青稞粉在贮藏过程中发生水解反应，生成游离脂肪酸，同时也反映出低温贮藏环境有助于延缓青稞中脂肪的水解速率。

作为催化三酰甘油水解产生二酰甘油、单酰甘油、游离脂肪酸和甘油的关键酶，脂肪酶活性与青稞质量下降密切相关[19]。图 1（B）揭示了不同贮藏条件对脂肪酶活性的影响：尽管所有条件下酶活均随贮藏时间显著上升（表明脂质持续水解），但变化速率差异显著。相比于贮藏初期（0 d），HH 组在第 14 d 酶活已显著高于初始水平（P<0.01），NN 组亦于第 14 d 显著上升（P<0.05），而 LL 组直至第 21 d 才出现显著变化（P<0.05）。贮藏至 28 d，HH 组的酶活从 41.04±0.58 mg/g 显著升高至 47.91±0.61 mg/g。

初级氧化产物氢过氧化物分解产生醛、醇、酸、酮等次级氧化产物，导致异味产生。其中，稳定且丰度高的次级终产物丙二醛是表征脂质过氧化状态的核心标志物[20]。图 1（C）所示 MDA 含量反映了青稞贮藏期间的脂质氧化程度。贮藏前 14 d，LL 与 NN 组 MDA 值维持较低水平，表明初始氧化酸败程度较轻。但 HH 组在第 14 d 时 MDA 从 45.41±2.10 nmol/ g 急剧升高至 72.36±1.71 nmol/ g，显著高于同期 LL、NN 组（P<0.05）。贮藏至 28 d，LL 组 MDA 含量（66.67±1.73 nmol/g）仍显著低于 HH 组（79.97±1.37 nmol/g）（P<0.05），证实高温环境显著促进青稞粉中 MDA 的积累。

2.2　青稞粉脂质组成的分析

基于前期研究结果，7 d 采样间隔所揭示的脂质变化趋势差异有限，且考虑到实验成本效益，本研究将采样间隔定为 14 d。随后，采用 UPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS 在 ESI^+和 ESI^-模式下对 LL、NN、HH 条件下贮藏 0 d、14 d、28 d 的青稞粉样品进行三次扫描，贮藏 0 d 样品的色谱图如图 2 所示。在青稞粉样品中发现了 234 种脂质：在负离子模式下发现 94 种，在正离子模式下发现 140 种。通过 LIPID MAPS 可将青稞中的脂质分为五大类，包括脂肪酰类（FAs）、甘油脂类（GLs）、甘油磷脂类（GPs）、鞘氨醇脂类（SPs）和甾醇脂类（STs）[21]。此外，这五大类又可进一步分为 23 个亚类，如图 3 所示。青稞脂质中含量最丰富的亚类为甘油三酯（TG，83 种），其次为二甘油酯（DG，29 种）和脂肪酰基（FA，25 种），表明其脂质组成具有高度多样性与复杂性。离子化模式分析显示：除 TG（$[M+NH_4]^+$）、DG（$[M+NH_4]^+$）、

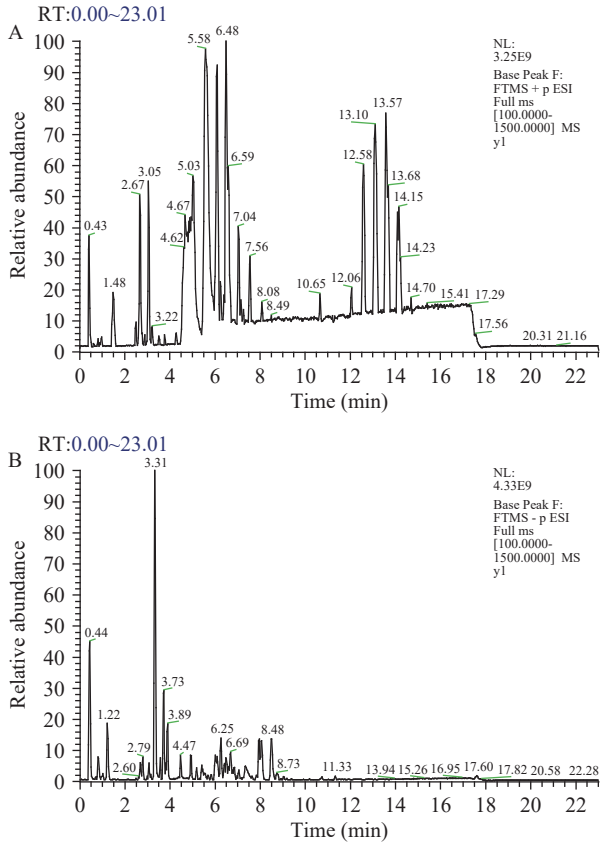


图 2 贮藏 0 d 样品在正离子模式(A)和负离子模式(B)下的基峰色谱图

Fig.2 Base peak chromatogram of sample in 0 day in positive ion mode (A) and negative ion mode (B)

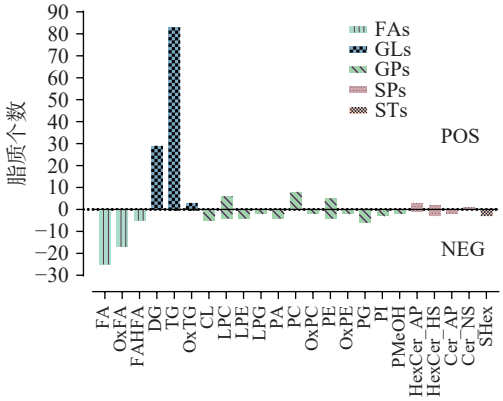


图 3 青稞粉中已鉴定的脂质亚类

Fig.3 Lipid subclasses identified in barley flour

心磷脂 CL([M-2H]$^{2-}$)、氧化磷脂酰胆碱 OxPC([M+CH_3COO]$^-$)、神经酰胺 Cer_NS([M+Na]$^+$)及硫苷脂 SHex([M+CH_3COO]$^-$)采用特定加合形式外,其余脂质均在 [M+H]$^+$或 [M-H]$^-$模式电离。

2.3 贮藏过程中青稞粉脂质含量的变化

本研究采用同位素内标法进行脂质相对定量分析。通过累加单个脂质分子含量,计算并比较青稞粉中各大类及亚类脂质的总量。不同贮藏时期脂质含量的动态变化趋势,则通过热图(图 4A、图 4B)直观呈现。青稞中含量最高的脂质大类是 GLs 和 GPs,其次是 FAs、SPs 和 STs。在贮藏期间,FAs 含量整

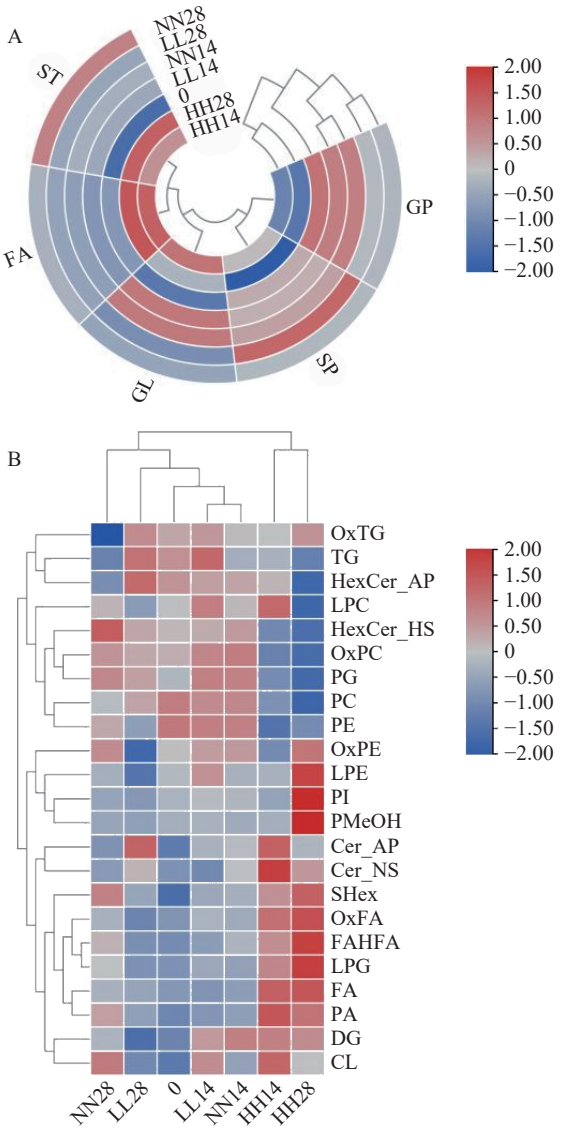


图 4 贮藏期间青稞粉中脂质的变化

Fig.4 Changes in lipids in barley flour during storage

注: A.贮藏期间青稞粉中脂质类别的变化; B.贮藏期间青稞粉中脂质亚类的变化。

体呈上升趋势, GLs 先上升后下降, GPs 呈下降趋势, SPs 在 NN 和 HH 条件下总体呈下降趋势, STs 呈上升趋势。青稞贮藏期间的脂质水解高度依赖于脂肪酶和磷脂酶, 而 GPs由于含有更多的不饱和键更容易被氧化[22], 所以 GLs和 GPs 向 FAs 转化。

未氧化和氧化的青稞样品中各类脂质的含量存在明显差异。在 HH 条件下, FAs 和 GLs 的含量均显著性增加(P<0.05), GPs 的含量显著性降低(P<0.05)。在 HH 条件下贮藏 28 d, 脂质代谢物含量发生了显著变化(P<0.05)。这是因为青稞粉中的脂质持续参与了相应的代谢反应。此外, 氧化过程随着青稞粉中抗氧化成分的降解而加剧。自由基和氢过氧化物等具有高氧化能力的脂质氧化产物也加快了氧化[23]。

TG 在脂肪酶的作用下水解为 FA 和甘油, 然后释放出 DG 或 MG, 并继续水解[24]。TG 和 DG 都处

于先上升后下降的趋势。青稞在去壳和碾磨等预处理过程中，从受损细胞膜渗出的 TG 会与胚乳层和胚芽组织中先前处于休眠状态但活性很高的脂肪酶接触而发生水解[25]。根据结果，在青稞中发现了 83 种 TG。在 LL 条件下，青稞中的 TG 含量呈现波动性变化，其含量的降低归因于脂肪酶的水解作用，而含量的回升，可能是由于甘油磷酸酰基转移酶（TAG/GL 合成的限速酶）的作用[26]。然而，在 NN 和 HH 条件下，青稞粉中的 TG 含量分别从 24075.31±1265.90 nmol/g 降至 15778.02±514.68 和 15644.84±423.46 nmol/g。上述结果表明，HH 条件下脂肪酶活性较高，从而加速了 TG 的水解。水解产生的脂肪酸会被进一步氧化，产生有异味的物质，并降低青稞的营养价值。DG 是生物体内主要的脂质亚类之一，是多种细胞活动的第二信使，还参与了 PC、PE 和 PS 等磷脂的生物合成[27]。本研究在青稞中检测到 29 种 DG。结果表明，在 NN 条件和 HH条件下，青稞粉中 DG 的含量先升高后降低。在本研究中，贮藏第 14 d 后，TG 和 DG 的含量呈下降趋势，Huo 等[28] 同样发现贮藏 9 个月的燕麦粉与新鲜燕麦粉相比较 TG 和 DG 的含量同样也呈下降趋势，该研究的整体趋势与文献报道中相同。

GPs 的亚类在维持细胞平衡中起着关键作用，是细胞膜的主要结构成分。贮藏期间的脂质水解高度依赖于脂肪酶和磷脂酶[23]。在 HH 条件下，PC、PE 和 PG 的丰度明显降低，这可能与青稞中的磷脂酶 A 有关。磷脂酶 A 由磷脂酶 A_1 和磷脂酶 A_2 组成，它们水解各自的酰基链，生成 FA 和溶血磷脂 LPL[29]。谷物中游离脂肪酸含量的变化也常被用作谷物贮藏质量的指标之一，游离脂肪酸含量与贮藏时间的结合可以有效地判断贮藏种子的质量[30]。总之，这些发现表明，青稞的脂质组成和含量会受到贮藏条件的极大影响。

神经酰胺和六糖基甘油三酯是鞘磷脂和糖鞘磷脂的组成部分，在调节细胞分化、增殖、凋亡、衰老等生命活动中发挥着重要作用[31]。这些分子是构成细胞膜脂质双分子层的重要结构化合物。特别是，神经酰胺参与了线粒体介导的细胞凋亡。研究结果表明，在 HH 条件下贮藏期间，HexCer 的含量明显下降，这表明贮藏条件对青稞中 HexCer 的降解有关键影响。Cer 的降解可能会导致线粒体功能障碍和细胞凋亡，从而影响青稞的贮藏质量。

2.4　脂肪酶活性与脂质变化的相关性分析

青稞在贮藏过程中脂肪酶活性与不同大类与亚类脂质含量之间的关系如图 5 所示。研究结果表明，脂肪酶活性与 STs（R=0.98）存在显著的正相关（P<0.05），也与 FAs、GLs 存在正相关。不过，与 GPs 和 SPs 存在负相关。酶活性越高，越能快速消耗底物（甾醇和脂肪酸），推动反应向酯化方向进行。然而，脂肪酶活性与 GPs 呈现显著的负相关（P<0.05），主要是与 PC 呈负相关。脂肪酶可催化 PC 分子的甘油酯键水解，PC 作为两性分子可形成胶束或脂双层，为脂肪酶提供活化界面，加速自身水解。脂肪酶活性与 GLs 整体呈正相关，但其与 TG 存在显著的负相关（P<0.05），脂肪酶直接水解甘油三酯，生成 FA 和甘油，从而降低 TG 水平；WANG等[32] 发现脂肪酶活性与 TG 和 DG 均呈负相关，而该研究 DG 与脂肪酶活性呈正相关，很可能是在当前设定的有限贮藏时间内，系统尚未完成从 DG 净积累向 DG 净消耗阶段过渡所导致的动力学现象。张明[33] 的研究表明了在贮藏过程中，米糠中脂肪酶活性逐渐升高，而 DG 的含量先增加后降低，本研究结果与之一致。在 LL、NN 和 HH条件下，GLs 都呈现先上升后下降的趋势，而温湿度越高，其幅度也越大。同时，结果发现青稞中的不同脂质之间存在着显著的相关性。例如 STs 和 FAs 存在显著的正相关。Doblado-Maldonado 等[34] 还发现，脂肪酶活性对谷物品质恶化至关重要。它不仅通过脂肪酶作用影响脂质水解酸败，还影响随后的脂肪酸降解和氧化。

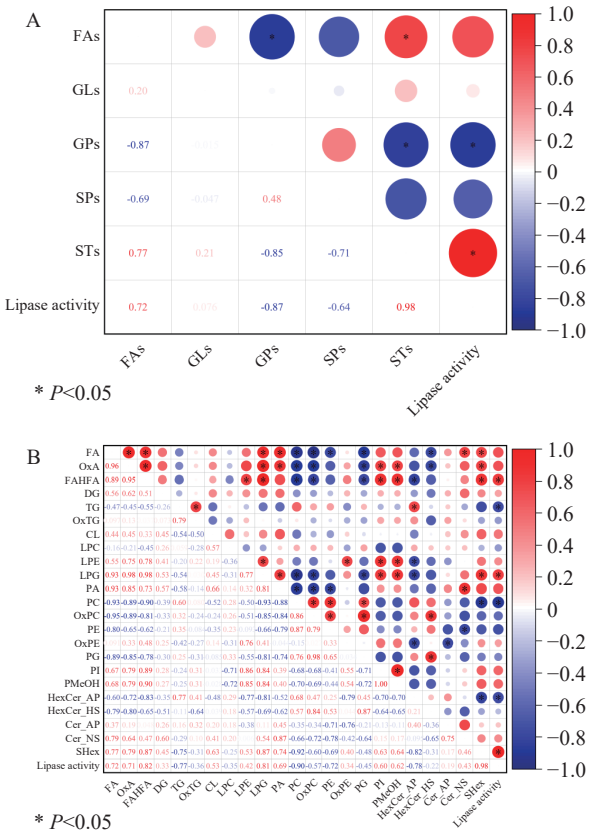


图 5　脂质与脂肪酶活性的相关性分析

Fig.5　Correlation analysis between lipid and lipase activity

2.5　青稞粉贮藏过程中显著差异脂质的筛选

为了进一步探索青稞粉的贮藏问题，对大量脂质组学数据进行了多元统计分析，并将数据可视化。通过对无监督模式识别进行了 PCA 分析，以初步了解组间总体代谢差异和组内样本差异。图 6A 显示了总体样本的 PCA 分数图，结果显示不同贮藏阶段的所有样品都是分离的，样品间差异很大。贮藏的样品

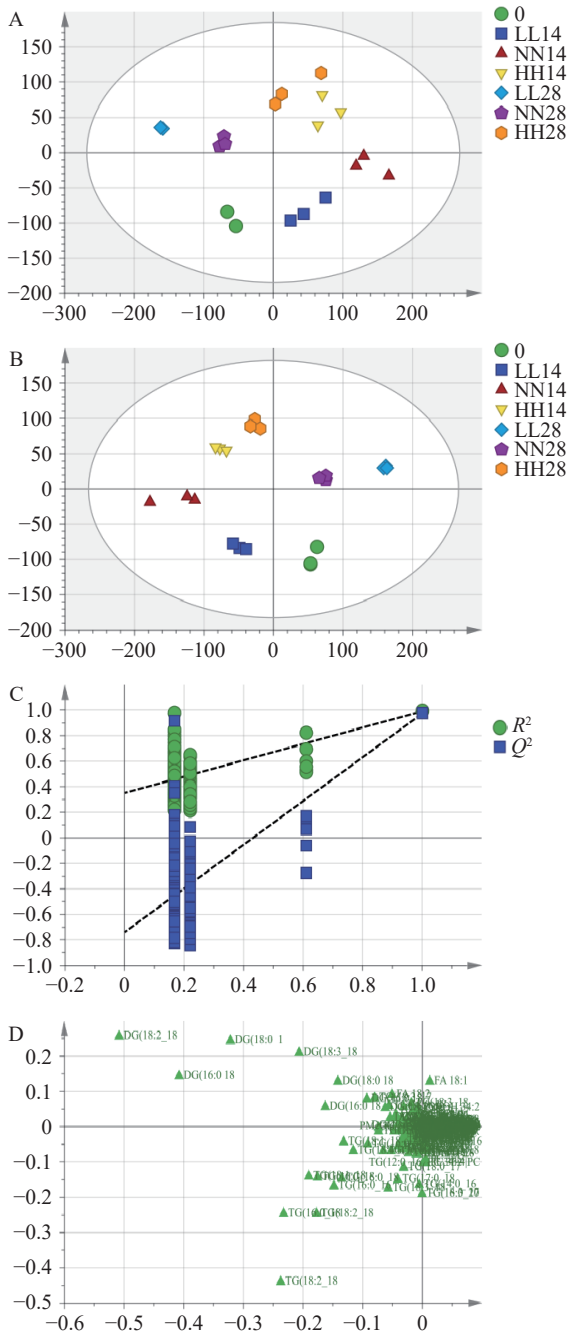


图 6　贮藏期间青稞粉的多元统计分析

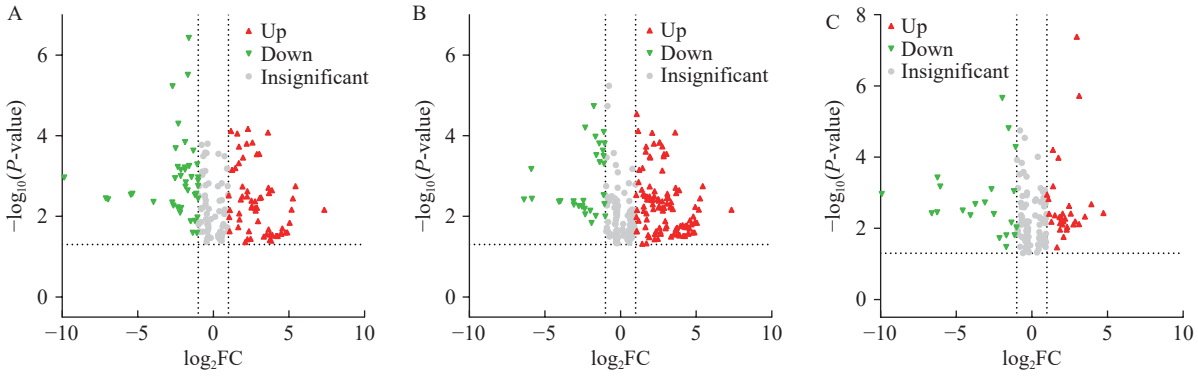
Fig.6　Multivariate statistical analysis of barley flour during storage

注：A. 脂质种类的 PCA 评分图；B. OPLS-DA 评分图；C. OPLS-DA 验证图；D. OPLS-DA 加载图。

与 0 d 明显分离，并且在后期贮藏阶段（14 d 和 28 d）向 PC2 方向发生进一步的变化。这些再次证实了贮藏条件的恶劣会导致青稞脂质改变。然后，根据 PCA 结果，构建 OPLS-DA 模型以进一步区分组间差异（图 6B）。OPLS-DA 是一种监督模型，与 PCA 不同，它使用偏最小二乘回归来建立表达、数量和样本类别之间的关系模型[35]。OPLS-DA 进一步验证了 PCA 结果，表明在不同贮藏阶段收集的样品之间存在差异。因此，通过 OPLS-DA 进一步分析了不同氧化阶段青稞粉脂质代谢的差异，与 PCA 相比，OPLS-DA 能更有效地解析数据的变化。OPLS-DA 评分图显示了青稞粉的加速氧化过程。OPLS-DA 评分图显示了青稞氧化过程中脂质组成的差异。在 HH 条件下，未氧化样品和其他样品之间有明显的差异，但在 LL 和 NN 条件下，14 d 和 28 d 氧化的样品之间差异较小。

本次分析中的自变量拟合指数（R^2X）为 0.992、因变量拟合指数（R^2Y）为 0.992，模型预测指数（Q^2）为 0.972，R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受。此外，模型的稳健性和可预测性也得到了 200 次置换检验结果的支持（图 6C），Q^2 的截距预计低于 0.00，说明 OPLS-DA 模型是可靠的、可预测的，并且没有过拟合，模型验证有效。VIP>1 的有 37 种脂质。结果证实，在 HH 条件下贮藏的青稞其脂质组学特征发生了显著变化。同时，OPLS-DA 的载荷图（图 6D）显示，TG 和 DG 类脂质是鉴别青稞粉的最重要变量，可用于区分新鲜青稞粉和氧化青稞粉。青稞的脂质含量在贮藏过程中会发生变化，这可能会对其营养成分和功能价值产生不利影响。

使用火山图可视化两组脂质种类相对含量的统计学显着差异。通过对七组脂质组成数据进行成对比较而获得的火山图如图 7 所示。每个点代表一个脂质分子，绿点代表下调的脂质，红点代表上调的脂质，灰点代表差异不显著的脂质。水平值和垂直值越大，所选脂质的变化就越显著。此外，使用 P 值和 FC 值筛选出青稞在贮藏过程中发生显著变化的脂质[36]。当 FC≥2 或 FC≤0.5 时，脂质种类被认定为具有差异性的脂质，去除相同的脂质分子后，在贮藏过程中的青稞鉴定出 176 个差异性脂质。



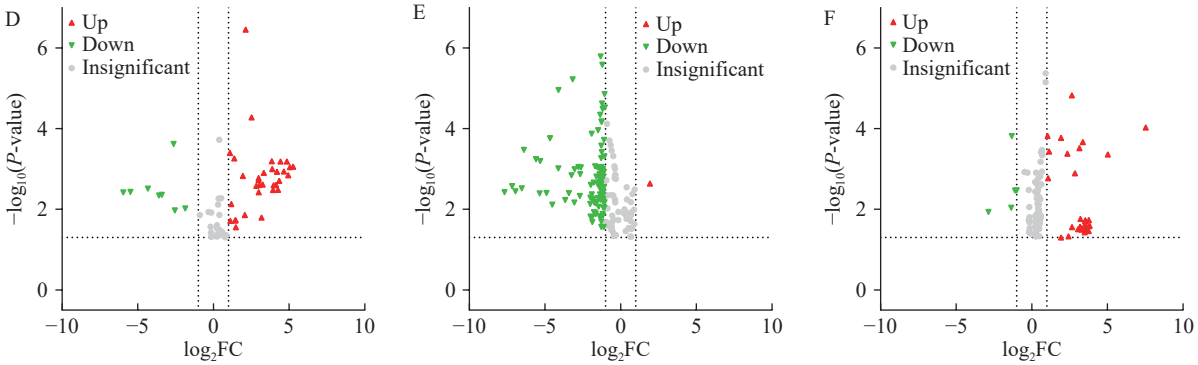


图 7　不同条件处理的青稞粉脂质与原始样品比较的火山图

Fig.7　Volcano plots of lipid profiles of processed and untreated barley flour samples

注：A 为 0 d 与 HH14；B 为 0 d 与 HH28；C 为 0 d 与 NN14；D 为 0 d 与 NN28；E 为 0 d 与 LL14；F 为 0 d 与 LL28。

由图 7 可知，HH28 上调的有 52 种，下调的有 30 种；HH14 上调的有 62 种，下调的有 42 种；NN28 上调的有 33 种，下调的有 8 种；NN14 上调的有 31 种，下调的有 24 种；LL28 上调的有 31 种，下调的有 5 种；LL14 上调的有 1 种，下调的有 101 种。在 LL14 条件下上调的脂质只有 FA 18:1 一种脂质，而 TG(18:1/18:1/18:2)、TG(20:0/18:3/18:3)等脂质显著(P<0.05)下调。TG 是天然油脂或脂肪的主要成分，通过脂质水解产生，进一步水解转化为 DG、MG 和甘油，并伴有脂肪酸的释放。因此本研究推断，少量脂质在 14 d 内开始水解。而 HH28 条件下上调的脂质总共有 52 种，DG(16:0/18:1)、FA 16:1;O、TG(18:3/18:3/19:1)、Cer 36:2;O2|Cer 21:2;O2/15:0、LPC 18:1、LPC 18:2 显著上调(P<0.05)，PC 36:5、TG(18:3/20:2/22:2)、PC 32:0|PC 16:0/16:0、PG 34:1|PG 16:0/18:1 显著下调(P<0.05)。溶血磷脂是磷脂代谢的中间产物，是重要的细胞膜成分，介于磷脂合成并帮助蛋白质嵌入细胞膜，由于磷脂降解或酶水解，LPC 等溶血甘油磷脂磷脂上调，PC、PG 下调[37]。随着贮藏时间和温湿度的增加，差异表达分析中显著上调的脂质数量显著增加(P<0.05)。火山图显示，$\log_2$(Fold Change)>1 且-$\log_{10}$(P-value)超过显著性阈值的脂质点数随贮藏时间和温湿度呈正相关趋势，表明脂质氧化或降解过程在高温高湿的条件下更容易累积。

3　讨论与结论

贮藏条件与时间显著影响青稞粉的脂质稳定性：低温低湿(LL)环境可有效抑制脂肪酶活性、游离脂肪酸(FA)与丙二醛(MDA)的积累，并延缓甘油酯(GLs)和甘油磷脂(GPs)的水解。相反，NN 组贮藏 14 d 及 HH 组贮藏 28 d 后，脂肪酶活性、FA 与 MDA 值显著上升(P<0.05)，表明脂质酸败已发生。本研究中对比清晰说明，低温低湿(LL)贮藏能有效抑制脂肪酶活性，延缓脂肪水解；而较高的温湿度(HH 和 NN)则会诱导酶活增加，加速水解进程并推动后续氧化。贮藏期间 MDA 水平的增加，进一步证实了不饱和脂肪酸的脂质过氧化反应，表明氧化是影响青稞脂质贮藏变化的关键因素之一。

脂质组学分析揭示新发现：共鉴定出 23 个亚类 234 种脂质，较既往研究(174 种)新增 60 种。DG 作为一种中间脂质，参与合成单半乳糖基二酰基甘油(MGDG)，二乳糖基二酰基甘油(DGDG)和磺基喹诺糖基-二酰基甘油(SQDG)，这些都是植物膜结构的基本组成部分，这些代谢物的改变与 DG 含量的波动有关[38]。DG 的积累可能是由于 TG 的降解，而作为 TG 合成的前体，DG 水平降低可能反映了增加贮藏时间加速了 DG 向 TG 的代谢转化或促进脂滴成熟[39]。相关性分析证实脂肪酶活性是脂质代谢的关键调控因子(r>0.8)，提示通过抑制该酶活性可提升贮藏稳定性。脂肪酶通过活性中心的氨基酸残基(如丝氨酸、组氨酸和天冬氨酸组成的“催化三联体”)与 STs 和 FAs 结合，形成过渡态复合物，降低反应活化能。活性越高的脂肪酶，单位时间内催化形成的 STs 越多[40]。多元统计表明，所有贮藏条件均导致脂质含量动态变化(部分升高或降低)，其中高温高湿(HH)环境对脂质组成的扰动最显著，加速氧化变质进程。上述结果为青稞产品保质期设定提供理论依据，首次系统阐明其脂质组成及贮藏期动态变化规律，深化了对青稞氧化机制的理解，有助于今后进一步研究青稞，促进青稞及其相关产品的开发和应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 李永富，王雪真，黄金荣，等. 基于自由基控制的青稞脂肪酶射频灭活技术研究[J]. 中国粮油学报，2022，37(7)：46−54. [LI Yongfu, WANG Xuezhen, HUANG Jinrong, et al. Radio frequency for lipase inactivation of highland barley based on free radicals control[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(7): 46−54.]

[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. [XU Fei, DANG Bin, YANG Xijuan, et al. Evaluation of nutritional quality of different hulless barleys[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(9): 1249−1257.]

[3] 郑敏燕, 耿薇, 王珊, 等. 青稞籽粒脂肪酸成分的 GC/MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(6): 155−157. [ZHENG Minyan, GENG Wei, WANG Shan, et al. The analysis on fatty components from the seed of hulless barley by GC/MS[J]. Food Research and Development, 2010, 31(6): 155−157.]
[4] 扎桑, 旺姆. 不同品种青稞籽粒储藏前后的脂质代谢组比较[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(8): 110−116. [ZHA Sang, WANG Mu. Lipid metabolomics of different highland barley cultivars during storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 110−116.]
[5] 龚凌霄, 曹文燕, 张英, 等. 青稞麸皮提取物抑制 α-葡萄糖苷酶活性研究及成分分析[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 179−184. [GONG Lingxiao, CAO Wenyan, ZHANG Ying, et al. Anti-α-glucosidase activities and bioactive components of Tibetan hull-less barley bran extracts[J]. Food Science, 2017, 38(6): 179−184.]
[6] GUO Tianli, HORVATH C, CHEN Ling, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 109−117.
[7] 胡敏. 不同储藏条件下西藏青稞品质劣化机制的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017. [HU Min. Study on the quality degradation mechanism of Tibetan Hullness Barley under different storage conditions[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.]
[8] 李尤好, 刘潇, 沈飞, 等. 高温储藏条件对花生油脂和蛋白质品质劣变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 105−111. [LI Youhao, LIU Xiao, SHEN Fei, et al. Effect of high temperature storage condition on quality deterioration of peanut oil and protein[J]. Food Science, 2023, 44(13): 105−111.]
[9] 石彬, 李咏富, 龙明秀, 等. 辐照处理对薏仁米中脂肪酸的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 7837−7843. [SHI Bin, LI Yongfu, LONG Mingxiu, et al. Effects of irradiation on fatty acids composition in *Coix* seed[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(21): 7837−7843.]
[10] 胡敏, 林亲录, 罗章, 等. 青稞储藏过程中与脂质氧化相关的陈化分子机制研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(2): 22−25. [HU Min, LIN Qinlu, LUO Zhang, et al. Study on the molecular mechanisms for aging associated with lipid oxidation of highland barley during storage[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(2): 22−25.]
[11] 李波. 小麦胚芽脂质快速酸败机制及稳定化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [LI B. Study on mechanism of rapid rancidity of wheat germ lipids and its stabilization technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
[12] CALLIGARIS S, MANZOCCO L, ANESE M, et al. Shelf-life assessment of food undergoing oxidation–a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(11): 1903−1912.
[13] 陈佳. 青稞贮藏过程中品质变化规律研究[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023. [CHEN Jia. Study on quality change law of highland barley during storage[D]. Nyingchi: Xizang College of Agriculture and Animal Husbandry, 2023.]
[14] HU Aipeng, WEI Fang, HUANG Fenghong, et al. Comprehensive and high-coverage lipidomic analysis of oilseeds based on ultrahigh-performance liquid chromatography coupled with electrospray ionization quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 8964−8980.
[15] 孙嘉阳. 基于脂质组学 UPLC-QTOF-MS 的榛子油自氧化规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. [SUN Jiayang. Study on autoxidation of hazelnut oil based on lipid proteomics UPLC-QTOF-MS[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.]
[16] WANG Ping, ZHONG Linlin, YANG Hongbin, et al. Comprehensive comparative analysis of lipid profile in dried and fresh walnut kernels by UHPLC-Q-Exactive Orbitrap/MS[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132706.
[17] LI Jia, HUA Jinjie, YUAN Haibo, et al. Investigation on green tea lipids and their metabolic variations during manufacturing by nontargeted lipidomics[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128114.
[18] NADER J, AFIF C, LOUKA N. Impact of a novel partial defatting technology on oxidative stability and sensory properties of peanut kernels[J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127581.
[19] 王雪真. 青稞脂肪酶射频灭活效果及其贮藏稳定性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [WANG Xuezhen. Study on RF inactivation effect and storage stability of highland barley lipase[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[20] CUSTODIO-MENDOZA J A, AJA-MACAYA J, VALENTE I M, et al. Determination of malondialdehyde, acrolein and four other products of lipid peroxidation in edible oils by Gas-Diffusion Microextraction combined with Dispersive Liquid-Liquid Microextraction[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1627: 461397.
[21] 张园园. 炒制对燕麦粉加工特性、贮藏品质及陈化机制影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [ZHANG Yuanyuan. Study on the influence of frying on the processing characteristics, storage quality and aging mechanism of oat flour[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]
[22] BUSZEWSKI B, WALCZAK J, ŻUVELA P, et al. Non-target analysis of phospholipid and sphingolipid species in egg yolk using liquid chromatography/triple quadrupole tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1487: 179−186.
[23] BAO Zhijie, KANG Da, XU Xiaomeng, et al. Variation in the structure and emulsification of egg yolk high-density lipoprotein by lipid peroxide[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(11): e13019.
[24] CHIANG Y P, LI Zhiqiang, CHEN Yang, et al. Sphingomyelin synthases 1 and 2 exhibit phosphatidylcholine phospholipase C activity[J]. Journal of Biological Chemistry, 2021, 297(6): 101398.
[25] 把亚波. 脂肪酶诱导的脂质氧化对藜麦粉品质劣变的影响机制研究[D]. 成都: 成都大学, 2024. [BA Yabo. Study on the mechanism of lipid oxidation induced by lipase on the quality deterioration of quinoa flour[D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.]
[26] WANG Huifang, WU Yanyan, XIANG Huan, et al. UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS-based untargeted lipidomics reveals molecular mechanisms and metabolic pathways of lipid changes during golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fermentation[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133676.
[27] ZHANG Dong, DUAN Xiaoliang, SHANG Bo, et al. Analysis of lipidomics profile of rice and changes during storage by UPLC-Q-extractive orbitrap mass spectrometry[J]. Food Research International, 2021, 142: 110214.
[28] HUO Rui, ZHANG Yuanyuan, ZHANG Meili, et al. Integrative lipidomics and proteomics reveal the aging mechanisms of heat-treated oat flour during long-term storage[J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102481.
[29] GAO Wenhao, YIN Qianlong, WANG Xiaodi, et al. UHPLC-Q-Exactive Orbitrap mass spectrometry reveals the lipidomics of bovine milk and yogurt[J]. Food Chemistry, 2022, 392: 133267.
[30] 叶霞, 李学刚, 张毅, 等. 稻谷中游离脂肪酸与脂肪酶活力的

相关性[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26(1): 75−77,80. [YE Xia, LI Xuegang, ZHANG Yi, et al. Relationship between free fatty acids of rice grains and lipase activity during storage[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2004, 26(1): 75−77,80.]

[31] SHERIDAN M, OGRETMEN B. The role of ceramide metabolism and signaling in the regulation of mitophagy and cancer therapy[J]. Cancers, 2021, 13(10): 2475.

[32] WANG Ji, HUANG Xuhui, WANG Xusong, et al. Compensatory effect of lipase on the flavor of lightly-salted large yellow croaker: Integration of flavoromics and lipidomics[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103907.

[33] 张明. 酶促米糠脂解制备甘二酯油脂及精炼工艺的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011. [ZHANG Ming. Preparation of diglyceride oil by enzymatic lipolysis of rice bran and the influence of refining process[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011.]

[34] DOBLADO-MALDONADO A F, PIKE O A, SWELEY J C, et al. Key issues and challenges in whole wheat flour milling and storage[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 119−126.

[35] LU Weibo, ZHANG Min, ZHANG Ting, et al. Impact of air-frying on the plasmalogens deterioration and oxidation in oyster revealed by mild acid hydrolysis and HILIC-MS-based lipidomics analysis[J]. Electrophoresis, 2021, 42(16): 1552−1559.

[36] LIU Yu, GUO Xin, WANG Niannian, et al. Evaluation of changes in egg yolk lipids during storage based on lipidomics through UPLC-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133931.

[37] SIMONS K, SAMPAIO J L. Membrane organization and lipid rafts[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2011, 3(10): a004697.

[38] DONG Xue, SHAO Jin, WU Xueyou, et al. Lipidomic profiling reveals the protective mechanism of nitrogen-controlled atmosphere on brown rice quality during storage[J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143081.

[39] WU Longkun, XUE Wenwen, SHEN Xiaolong, et al. Effects of microwave-assisted enzymatic treatment on the quality characteristics of sunflower seed oil: A comprehensive investigation based on Lipidomics and volatile flavor compound profiling[J]. Food Chemistry, 2025, 491: 145217.

[40] 张欣, 陈书曼, 吴楠, 等. 选择性修饰 MCM-41 固定化脂肪酶及其催化合成甾醇酯的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 192−199. [ZHANG Xin, CHEN Shuman, WU Nan, et al. Selective modification of MCM-41 immobilized lipase and its application in sterol ester synthesis[J]. Food Science, 2019, 40(20): 192−199.]