

发芽对裸燕麦营养品质的影响

周雯瑾¹, 黄凯¹, 李森¹, 管晓¹, 高省元²

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 无锡御糖食品科技有限公司, 无锡 214000)

摘要: 发芽是一种有效提升谷物营养特性的绿色加工方法, 为了进一步改善裸燕麦的营养价值, 研究了不同发芽时间处理对裸燕麦营养品质的影响。研究结果显示, 发芽对蛋白质含量无影响, 但能提升裸燕麦内源淀粉酶及脂肪酶活性, 造成脂肪含量显著下降及淀粉颗粒形貌改变。游离氨基酸含量随发芽时间增加呈先下降后上升的趋势, 且氨基酸组成中谷氨酸、丝氨酸显著降低, 丙氨酸、甲硫氨酸、异亮氨酸显著增加。体外模拟消化结果显示, 发芽能显著改变淀粉、蛋白质及脂肪的消化特性, 相比于0 d, 发芽1 d的裸燕麦还原糖释放量下降17.95 mg/g, 蛋白质水解度提升14.23%, 脂肪酸释放量下降29.73 $\mu\text{mol/g}$ 。综合上述研究结果, 发芽1 d的裸燕麦是一款具有低升糖、低脂肪消化和高蛋白利用的营养产品, 本研究为裸燕麦提质增效开发与研究提供了新思路。

关键词: 发芽; 裸燕麦; 营养品质; 消化; 酶活性

中图分类号: TS 210.1 文献标志码: A

Effect of germination on nutrition quality of naked oat

ZHOU Wenjin¹, HUANG Kai¹, LI Sen¹, GUAN Xiao¹, GAO Shengyuan²

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Wuxi Yutang Food Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Germination is an effective and sustainable processing method in enhancing nutrition quality of cereals. In order to improve the nutritional value of naked oat, the effect of germination time on oat quality was investigated in this study. The results showed that germination didn't have effect on protein content. However, germination could activate endogenous lipase and amylase, which led to the decrease of lipid content and the changes of the micromorphology. The contents of free amino acids decreased first and then increased with the extension of germination time. Additionally, germination changed the amino acid components of the oat, resulting in the decreases of glutamic acid and serine, and the increases of alanine, methionine and leucine. Gastrointestinal simulation in vitro showed that germination could change the digestion properties of oat starch, protein and lipid. Compared with the 0-day germinated oat, the releasing content of reducing sugar declined as 17.95 mg/g lower, the degree of protein hydrolysis increased as 14.23%, and the releasing content of fatty acid was 29.73 $\mu\text{mol/g}$ lower than the 1-day germinated oat, respectively. Based on the results above, we found that 1-day germinated

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32202054); 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0002); 上海市2023年度“科技创新行动计划”国内科技合作项目(23015820700)

第一作者: 周雯瑾(1998-), 女, 硕士研究生。研究方向: 食品营养与谷物加工。E-mail: 793818834@qq.com

通信作者: 管晓(1979-), 男, 教授。研究方向: 粮油加工。E-mail: gnxo@163.com

oat had the advancements of lower GI value and lipid digestion and higher protein digestion, and our study could provide proper methods in promoting the processing and utilization of naked oats.

Keywords: *germination; naked oats; nutrition quality; digestion; enzyme activity*

燕麦分布于多个大洲, 世界燕麦种植面积为 1 283 万公顷。国外燕麦种植以皮燕麦为主, 而我国大部分地区种植的是裸燕麦。裸燕麦的生育期短, 对生长土壤要求不严格, 适合种植在干旱、半干旱盐碱地区, 是我国西北等偏远地区的主要农作物^[1]。燕麦作为一种全谷物食品, 富含蛋白质、膳食纤维、多酚、维生素和矿物质等, 是公认的最具保健功效的“全营养食品”^[2]。

目前, 我国裸燕麦加工方法相对简单、粗糙, 导致产品同质化严重、经济效益差。同时, 随着生活水平的不断提升, 一系列慢性病爆发已严重影响了国民的健康水平, 提升食品的营养功效对预防慢性病具有重要意义^[3]。谷物加工中发芽技术是提升谷物营养与感官品质的一种有效且绿色的加工方法。谷物发芽通过激活内源淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶、蛋白酶等, 对宏量及微量营养物质进行加工与结构改造, 并最终显著提升谷物中多酚、 γ -氨基丁酸等多种有益活性组分。对淀粉、蛋白、脂肪等大分子进行不同方向的改造, 可提升发芽食品的营养与功能特性^[4-5]。

目前, 国内有关发芽加工产品的研究主要集中在豆类食品上, 而针对裸燕麦发芽产品的研究与开发相对较少。本研究主要从基本组成含量、内源酶活性、发芽燕麦微观形态、游离氨基酸含量、发芽燕麦氨基酸组成和宏量营养素(淀粉、蛋白、脂肪)体外模拟消化的变化情况探究不同发芽时间对燕麦品质特性的影响, 以期对裸燕麦新产品、新技术开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料和仪器

1.1.1 材料试剂

裸燕麦由内蒙古燕谷坊全谷物产业发展有限责任公司提供; 次氯酸钠、葡萄糖标准品(纯度 $\geq 99\%$)、氢氧化钠、氯化钙、氯化钠、浓盐酸; 胆盐、胰酶、邻苯二甲醛(OPA)购自上海阿拉丁有限公司。游离脂肪酸含量检测试剂盒购自生工生

物工程有限公司(中国上海)。所用试剂均为分析纯, 实验用水均为蒸馏水。

1.1.2 仪器设备

DHG-95 恒温循环水浴槽, 上海衡平仪器仪表厂; MYP11-2 磁力搅拌器, 上海梅颖浦仪器仪表制造公司; UV-2800A 可见分光光度计, 尤尼柯(上海)仪器有限公司; SYNERGE HTX 酶标仪, 美国 Berten 公司; DK-8AX 电热恒温水槽, 上海一恒科学仪器有限公司; Milli-Q 超纯水设备, 美国 Millipore 公司; L550 离心机, 湖南湘仪离心机仪器有限公司; SU8010 扫描电子显微镜, 日本日立有限公司; ME204E 分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 燕麦发芽处理工艺

燕麦发芽处理参照秦萍^[6]的方法并稍作修改, 具体包括: 室温下将 5 组 20 g 挑选好的燕麦种子浸没于 50 mL、体积分数 2% 的次氯酸钠溶液中。浸泡 15 min 后用自来水冲洗至少 5 次, 再将处理后的燕麦种子浸泡于 200 mL 蒸馏水中, 浸泡 4 h。浸泡结束, 纱布滤干并将燕麦均匀摊在湿棉布上, 置于 20 ℃ 且 95% 相对湿度的恒温恒湿培养箱中进行避光发芽。每隔 1 d 取一次样, 连续 4 d。收集到的发芽燕麦在 50 ℃ 烘箱中干燥至恒重, 手工除去根和芽后进行研磨处理。制得的燕麦粉随后过 80 目筛, 并置于-20 ℃ 冰箱中作为样品待用。

1.2.2 基本成分的测定

水分含量的测定: 参照 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》;

蛋白质含量的测定: 参照 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》;

脂肪含量的测定: 参照 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》;

灰分含量的测定: 参照 GB 5009.4—2016《食品中灰分的测定》。

1.2.3 发芽燕麦粉微观形态观察

使用 SU8010 扫描电子显微镜(SEM)测定发芽燕麦样品的微观形态。将粉状样品粘在导电胶布

上进行镀金处理,调整焦距、放大倍数进行观察并拍摄^[7]。

1.2.4 粗酶液提取及酶活测定

称取发芽燕麦粉 2.5 g,加入 25 mL 蒸馏水,室温下充分震荡混匀 4 h,之后离心收集上清液并定容至 50 mL,所得溶液作为粗酶液^[5]。

参照张俊等^[8]报道的 DNS 法测定发芽燕麦的淀粉酶比活力。淀粉酶比活力单位定义为:1 g 样品中淀粉酶,在 45 ℃ 下反应 1 min 生成 0.1 mg 还原糖所需要的酶量为 1 个比酶活单位 U/g。

样品中脂肪酶活力测定参照 GB/T 5523—2008。脂肪酶比活力单位定义为:1 g 样品中脂肪酶,在室温下反应 1 min 生成的脂肪酸用氢氧化钾滴定至中性所需的毫克数为 1 个酶比活力单位 U/g。

1.2.5 游离氨基酸及氨基酸组成分析

参照 GB/T 8314—2013 方法测定样品中游离氨基酸的总含量。

样品中氨基酸组成分析参照谭杨等^[9]的方法进行测定并加以修改,用浓度 6 mol/L 的盐酸 1 mL 与 5 mg 样品混合置于消解管中,将密封的管置于 (110±1) ℃ 的消解仪中消解 16 h。将水解样品通过滤纸过滤并稀释定容至 50 mL。随后通过 OPA 衍生化和高效液相色谱(HPLC)对氨基酸进行定性与定量分析。

1.2.6 体外胃肠模拟消化

a. 以 1:20 料液比配制燕麦溶液,在 100 ℃ 沸水中糊化 1 h。

b. 胃消化液:氯化钠 2 g,盐酸 7 mL,加蒸馏水定容至 1 L 配置胃缓冲液,胃缓冲液中加入胃蛋白酶至终浓度 0.64 g/100 mL,37 ℃ 充分溶解,形成胃消化液。

c. 肠消化液:氯化钙 30 mmol,氯化钠 450 mmol,加蒸馏水定容至 1 L 配置肠缓冲液,肠缓冲液中加入胆盐和胰酶至终浓度 3 mg/mL 和 6 mg/mL,37 ℃ 充分溶解,形成肠消化液。

d. 胃模拟消化:取燕麦溶液和胃消化液各 250 mL,置于酶反应器中,燕麦溶液与胃消化液比例为 1:1,用浓度 6 mol/L 的盐酸调节 pH 至 2.0,37 ℃、180 r/min 转速下消化,在 120 min 时直接吸取 10 mL 混合均匀的悬浊液用作消化产物,保存于-20 ℃ 冰箱。

e. 肠模拟消化:胃消化结束后,用浓度 1 mol/L 的氢氧化钠调节 pH 至 7.0,随后加入肠消

化液,肠液和燕麦溶液的比例为 1:1,消化期间保持 pH 稳定,37 ℃、180 r/min 转速下消化,在 120 min 时直接吸取 10 mL 混合均匀的悬浊液用作消化产物,保存于-20 ℃ 冰箱。

1.2.7 消化产物中脂肪酸释放量测定

利用游离脂肪酸试剂盒进行游离脂肪酸释放量检测,以棕榈酸标准品绘制标准曲线,根据标准曲线计算样品中游离脂肪酸含量,脂肪酸释放量等于消化后与消化前游离脂肪含量的差值。

1.2.8 消化产物中蛋白质水解度测定

参照 Gwala 等^[10]的方法配置 OPA 试剂,消化产物与 24% 三氯乙酸溶液进行等体积混合,充分震荡混匀后离心取上清液,取 400 μL 上清液与 3 mL OPA 试剂混匀,室温下反应 2 min,随后在 340 nm 下测定吸光度值,记为 A_1 。另取同等量消化产物样品进行氮吹浓缩,并加入适量 6 mol/L 的盐酸并置于消解仪中消解 16 h,调节 pH 至中性并离心取上清液,采用同样方法与 OPA 试剂进行反应,测定吸光度值记为 A_2 。各发芽燕麦样品的最终蛋白质水解度值为 A_1/A_2 的百分数。

1.2.9 消化产物中还原糖释放量测定

取消化液样品并在室温下以 10000 r/min 转速离心 10 min,获得上清液。按照 1.2.4 的方法,采用 DNS 法测定还原糖含量。还原糖释放量等于消化后与消化前还原糖含量的差值。

1.3 数据分析

实验均重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。应用单因素方差分析和邓肯检验对数据进行显著性分析, $p<0.05$,说明存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 发芽对裸燕麦营养成分含量的影响

不同发芽时间处理对裸燕麦营养成分含量的影响如表 1 所示。研究结果表明,发芽 4 d 内裸燕麦蛋白质、灰分、水分含量变化不显著或变化幅度较小,而脂肪及碳水化合物含量具有显著变化。发芽 4 d 燕麦,脂肪比例相较发芽前下降了 2.26%,而碳水化合物比例相较发芽前升高了 1.68%。宏量营养成分变化规律说明,燕麦发芽过程中主要利用的宏量营养素为脂肪及碳水化合物,且种子内部物质偏向碳水化合物转化,并用于种子的生长^[11]。为进一步探究宏量营养素在发

表 1 发芽裸燕麦中各营养成分含量

Tab.1 The basic components of germinated naked oats

组分含量	发芽0 d	发芽1 d	发芽2 d	发芽3 d	发芽4 d
蛋白质/%	12.54±0.02ab	12.42±0.14b	12.71±0.08ab	12.66±0.10ab	12.78±0.19a
脂肪/%	9.24±0.60b	9.41±0.08a	8.61±0.15c	8.75±0.30c	6.98±0.32d
碳水化合物/%	68.35±0.74c	68.45±0.35bc	68.90±0.70b	69.10±0.68b	70.03±0.78a
淀粉/%	57.29±0.10a	56.39±0.08ab	55.10±0.03b	54.83±0.06b	52.65±0.02c
灰分/%	1.49±0.01a	1.41±0.01b	1.38±0.05b	1.43±0.03ab	1.40±0.01b
水分/%	8.38±0.09a	8.31±0.02bc	8.40±0.11bc	8.06±0.19c	8.81±0.44b
还原糖含量/(mg·g ⁻¹)	108.54±2.01d	95.93±1.60e	115.37±2.90c	180.54±1.13b	304.45±3.89a
游离氨基酸含量/%	0.61±0.03b	0.44±0.04a	0.43±0.01a	0.44±0.01a	0.55±0.06b
游离脂肪酸/%	—	—	—	—	—

注: 每个角落实验重复3次; 不同小写字母表示同一测量指标不同组间差异显著($p < 0.05$); “—”表示未检出。

芽过程中的内在规律, 本研究考察了蛋白质、碳水化合物、脂肪的分解产物变化规律。研究发现, 游离氨基酸含量随着发芽时间增加呈先下降后上升的趋势, 但游离氨基酸含量在发芽燕麦样品中所占比例较小, 变化幅度相对较小, 说明蛋白质水解程度相对较小, 或存在蛋白质内部的氨基酸相互转换^[12]。游离脂肪酸含量未在各样品中被检出, 说明在发芽燕麦种子内部, 脂肪分解产生的游离脂肪酸会被快速消耗利用, 存在时间相对较短^[13]。还原糖含量变化主要由燕麦种子内部淀粉水解所导致, 还原糖是 3 大宏量营养素在发芽过程中分解产物变化最为显著的一项。燕麦发芽 2 d 已有较大含量提升, 至发芽 4 d, 还原糖含量提升近 3 倍, 该结果间接说明了燕麦在发芽过程中具有较强活力的淀粉酶等碳水化合物酶。总体上看: 相比于发芽 0 d, 发芽 1 d 燕麦在物质组成变

化上相对较小, 属于发芽的准备阶段; 发芽 2~3 d, 物质组成有了显著变化, 说明该阶段为发芽初始阶段; 发芽 4 d, 燕麦内部主要组成都有了最大幅度的变化, 说明该阶段已至发芽的快速阶段。不同发芽阶段, 燕麦种子内部变化幅度存在差异, 而造成该差异的主要原因是内源酶活性的变化^[14]。

2.2 发芽过程中裸燕麦内源酶活性变化

裸燕麦发芽过程中内源酶活性变化如图 1 所示。图中不同小写字母表示同一测量指标不同组间差异显著($p < 0.05$)。由于蛋白质及氨基酸含量在变化幅度上相对较小, 因此, 本研究将重点考察有关碳水化合物/还原糖和脂肪含量变化直接相关的水解酶活性。

谷物发芽过程中, 淀粉酶被激活可以使种子充分调动胚乳中存储的大量淀粉类物质, 为种子的发育生长提供能量^[15]。如图 1(a) 所示, 发芽燕

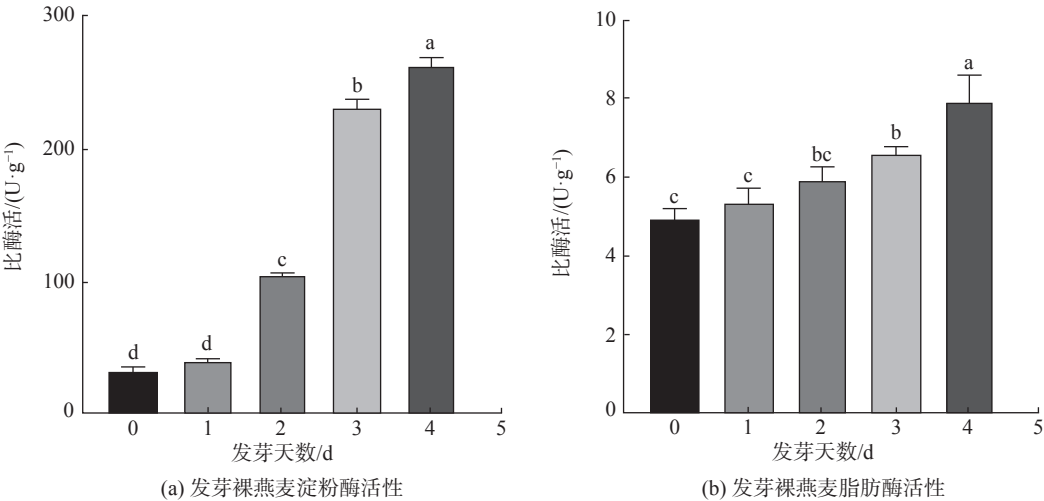


图 1 发芽过程中裸燕麦酶活性的变化

Fig.1 Changes of enzyme activity in naked oat during germination

麦中淀粉酶活性随发芽时间延长而显著上升，与还原糖含量呈正相关变化，说明了内源淀粉酶激活能有效催化水解淀粉中糖苷键断裂，产生麦芽糖、葡萄糖等小分子糖类物质^[16]。发芽0 d燕麦淀粉酶活性相对较低，仅有31.90 U/g，这与燕麦种子中自由水比例有一定关系，种子内部组分在发芽初始阶段水合效应相对较低，因此淀粉代谢活性不强^[17]。而发芽2 d，燕麦淀粉酶活性有较大幅度增加，淀粉酶活性增长速率较快。发芽4 d，淀粉酶活性达到峰值，为236.80 U/g，是发芽0 d的8.20倍。淀粉酶活性显著增加与吸水速率的增加有直接关系，随着发芽时间延长，种子内部结构由于酶解作用，变得相对疏松，该情况会导致酶解速率的不断加快^[18]。

燕麦脂肪含量相对较高，相较于其他谷物，燕麦籽粒的特殊之处就在于正常状态具有较高的脂肪相关酶活性，其中脂肪酶是燕麦的特征酶，脂肪酶能够将甘油三酯水解为游离脂肪酸。对于燕麦籽粒储藏来说，游离脂肪酸是脂肪氧化劣变的前体物质^[19]，而对于发芽燕麦来说，游离脂肪酸是代谢的标志物，可为种子的生长提供保障。如图1(b)所示，发芽燕麦中脂肪酶活性随发芽时间延长而显著上升，与脂肪含量呈负相关变化，表明发芽激活了内源脂肪酶活性，对脂肪水解起到了一定作用^[20]。发芽过程中，燕麦具有较高的初始脂肪酶活性，发芽0 d，脂肪酶活力可达4.90 U/g，当发芽3~4 d，燕麦脂肪酶活性有显著上

升，最高可达7.95 U/g，相比0 d增加近3.00 U/g。同淀粉酶相似，脂肪酶活性的增加与籽粒内部水分活性相关，吸水作用增强加上合适的温度，极易提升脂肪酶活性，此外，脂肪酶活性的增加，对于改善燕麦风味也具有重要作用^[21]。

2.3 发芽对裸燕麦微观结构的影响

为进一步研究发芽对燕麦内部组分及结构的影响，本研究采用SEM对发芽燕麦粉进行表征。SEM可以通过电子束与样品相互作用产生次级电子并转化为信号，从而直观反映物体微观表面的具体形貌^[22]。如图2所示，发芽燕麦粉中主要颗粒为球形或椭球型的淀粉颗粒，然而随着发芽的不断进行，淀粉酶活性越来越高，导致淀粉颗粒表面变得更加具有棱角(红色箭头所示)，球体更为不规则。此外，在淀粉颗粒表面附近，不规则小颗粒聚集愈发显著，推测这些颗粒可能是蛋白质和膳食纤维形成的复合体^[22]。同时，这些小颗粒结合并不是很紧密，说明蛋白酶、纤维素酶等内源酶活力不断提升，与淀粉颗粒接触的大分子物质不断被降解^[23]，从而导致该现象的发生。

2.4 发芽裸燕麦氨基酸组成分析

以上研究结果表明，发芽对裸燕麦蛋白质含量变化影响较小，主要存在蛋白酶激活程度相对较低的可能，但谷物发芽过程中，导致蛋白质变化的酶除蛋白酶之外，还有许多催化酶，而这些酶对氨基酸组成能够造成较大影响^[24]。发芽对裸燕麦氨基酸组成的影响如表2所示。发芽能够显

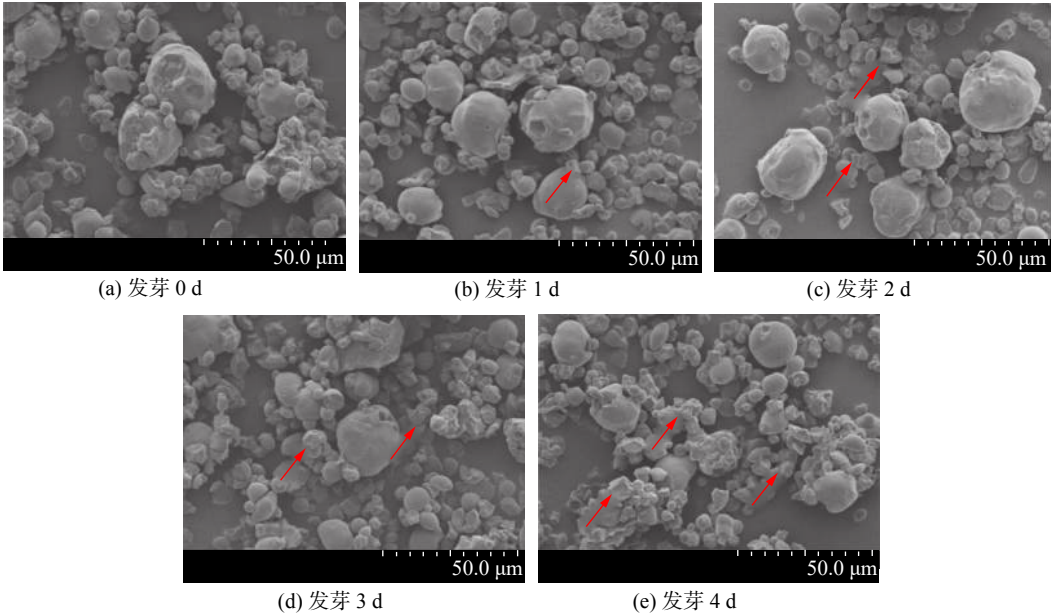


图2 发芽过程中裸燕麦微观结构的变化

Fig.2 Changes of microstructure of naked oat during germination

著降低谷氨酸、丝氨酸含量, 相比于发芽 0 d, 发芽 1 d 即可分别降低 1.26% 和 1.88%。谷物发芽能够激活谷氨酸脱羧酶催化谷氨酸产生 γ -氨基丁酸 (GABA), 而 GABA 是一种重要的抑制神经传递物质, 且具有较强的抗氧化功效, 对机体具有显著的益生作用。此外, 发芽能够促进谷物种子呼吸作用, 增强并激活乙醛酸氨基转移酶消耗丝氨酸供种子生长^[25]。因此, GABA 的生成和呼吸作用是发芽燕麦中谷氨酸、丝氨酸含量降低的潜在因素。发芽能够显著提升丙氨酸、甲硫氨酸和异亮氨酸含量, 发芽 4 d 能分别提升 1.04%, 0.11% 和 0.90%。丙氨酸、甲硫氨酸和异亮氨酸往往在种子发芽过程中对发芽率、抗胁迫、形成叶绿素等具有重要作用, 而发芽程度越高, 往往这些氨基酸的含量也相对越高^[26]。另外, 甲硫氨酸和异亮氨酸是人体必须氨基酸, 其含量增加对于谷物产品氨基酸评分提升具有促进作用^[27]。

2.5 发芽裸燕麦消化特性分析

发芽是一种温和、绿色、环保的谷物加工方法, 改善谷物的营养特性是使用该方法的重要目的之一。在本研究中, 研究人员重点考察了蛋白质、碳水化合物和脂肪 3 大宏量营养素的消化特性。

淀粉是谷物中主要的碳水化合物, 也是谷物中含量最高的化合物, 在胃肠消化中被淀粉酶、糖化酶等不断水解, 变为葡萄糖等还原糖基本单元后被机体吸收利用^[28]。发芽燕麦的淀粉消化特性如图 3(a) 所示, 结果显示, 相比于发芽 0 d, 发芽 1 d 的还原糖释放量显著下降(约 17.95 mg/g), 而发芽 2, 3, 4 d 燕麦还原糖释放量则显著增加 55.75, 63.45 和 139.08 mg/g。研究人员推测发芽导致燕麦籽粒中多酚等淀粉酶抑制剂浓度增加, 且发芽 1 d, 内源淀粉酶活性较弱对淀粉损伤程度较低, 这是造成发芽 1 d 还原糖释放量降低的主要因素^[29]。而随着发芽时间延长, 发芽过程中内源淀粉酶对淀粉颗粒的水解作用占据了主导地位, 淀粉颗粒不断减小且变为不规则形状, 导致了胃肠消化淀粉酶更容易对淀粉颗粒进行水解, 从而在消化中显著提升了还原糖释放量^[30]。目前, 肥胖已严重影响了国民身体健康, 而低升糖指数 (GI) 的谷物食品对预防肥胖具有积极意义^[31]。因此, 从低还原糖释放量、低 GI 角度上看, 发芽 1 d 的燕麦具有一定优势。

发芽燕麦的蛋白消化特性如图 3(b) 所示, 结果显示, 发芽燕麦蛋白质水解度呈先增加后降低

表 2 发芽过程中裸燕麦氨基酸组成的变化
Tab.2 Changes in amino acid composition of naked oat during germination

氨基酸种类	氨基酸含量/%				
	发芽0 d	发芽1 d	发芽2 d	发芽3 d	发芽4 d
天冬氨酸	5.76±0.01c	5.27±0.06ab	5.16±0.03a	5.23±0.07a	5.35±0.02b
谷氨酸	13.11±0.00d	11.85±0.19c	11.66±0.13bc	11.57±0.03b	11.11±0.07a
丝氨酸	5.49±0.02d	3.61±0.03a	3.96±0.01c	3.88±0.06c	3.71±0.03b
甘氨酸	9.65±0.01a	9.88±0.12b	9.67±0.08a	9.66±0.04a	9.55±0.03a
组氨酸	1.91±0.02a	1.92±0.01a	1.97±0.01b	2.00±0.00c	1.93±0.00a
精氨酸	4.28±0.01a	4.46±0.04b	4.47±0.02b	4.71±0.04c	4.47±0.01b
苏氨酸	3.52±0.01c	3.10±0.06a	3.20±0.04ab	3.25±0.03b	3.13±0.01a
丙氨酸	7.53±0.01a	8.16±0.04b	8.29±0.02c	8.44±0.02d	8.57±0.00e
脯氨酸	15.25±0.28a	16.21±0.44b	16.32±0.11b	15.58±0.16ab	16.36±0.03b
酪氨酸	0.68±0.01a	0.96±0.01b	1.03±0.00b	1.28±0.21c	1.05±0.15b
缬氨酸	6.84±0.06a	7.02±0.03b	7.08±0.02b	7.07±0.10b	7.13±0.06b
甲硫氨酸	0.15±0.00a	0.23±0.04ab	0.27±0.03b	0.29±0.05b	0.26±0.01b
半胱氨酸	0.12±0.01a	0.11±0.05a	0.14±0.03a	0.13±0.05a	0.14±0.01a
异亮氨酸	4.83±0.02a	5.65±0.00d	5.57±0.01b	5.61±0.01c	5.73±0.00e
亮氨酸	8.36±0.05a	8.78±0.07b	8.77±0.01b	8.79±0.04b	8.78±0.02b
苯丙氨酸	4.59±0.03a	4.71±0.02b	4.71±0.01b	4.73±0.00b	4.68±0.01b
赖氨酸	7.93±0.17a	8.06±0.18a	7.73±0.01a	7.8±0.20a	8.05±0.14a

注: 每个角落实验重复3次; 不同小写字母表示同一测量指标不同组间差异显著($p < 0.05$)。

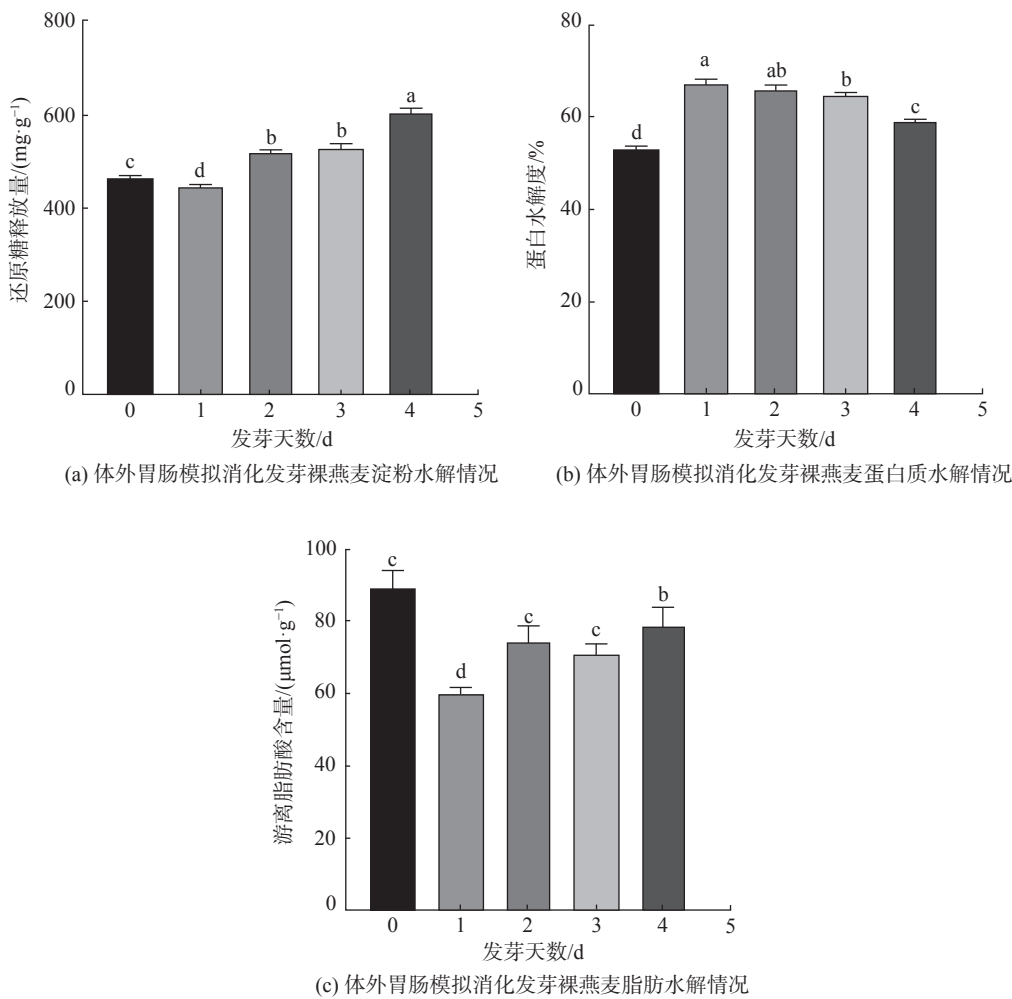


图3 发芽裸燕麦消化特性

Fig.3 Digestive characteristics of germinated naked oats

的趋势，其中发芽 1 d 水解度值最高，为 67.59%，比发芽 0 d 高 14.22%，比发芽 4 d 高 8.20%。推测氨基酸组成变化及蛋白酶抑制成分随发芽时间延长不断增加是造成水解度差异的主要原因，蛋白质水解度能反映蛋白质的消化利用情况，高水解度能有效反映高生物利用程度^[32]，因此，发芽 1 d 在燕麦蛋白质质量提升上具有一定优势。

发芽燕麦的脂肪消化特性如图 3(c) 所示，结果显示，相比于发芽 0 d (89.36 μmol/g)，发芽 1 d 及以上燕麦脂肪酸释放量显著降低，推测发芽导致多酚等脂肪酶抑制成分含量增加是造成该现象的主要因素，此外，随着发芽时间的延长，脂肪酸释放量逐渐增加，该现象与蛋白及淀粉的乳化特性变化相关^[33]。发芽导致内源酶被激活，使燕麦淀粉、蛋白分子量减小，水溶特性改变，从而提升了乳化特性^[34]。发芽燕麦能够更好地在胃肠消化中分散脂肪，利于脂肪的水解。燕麦是一种高脂肪含量的食物，脂肪水解程度越高在一定程

度上会产生更高的脂肪吸收作用，而发芽 1 d 的燕麦具有最低的脂肪酸释放量 (59.63 μmol/g)，因此，发芽 1 d 在抑制脂肪吸收上具有一定优势。

3 结 论

发芽是一种绿色、环保的加工方法，在谷物加工中具有独特优势^[34]。本研究以裸燕麦为研究对象，探究了发芽对裸燕麦品质的影响。研究结果显示，发芽能显著降低脂肪含量，提升总碳水化合物及还原糖含量，而对蛋白质及其他组分影响较小。发芽裸燕麦的组分变化与内源酶活性变化直接相关，发芽能显著提升内源淀粉酶及脂肪酶活性，导致发芽裸燕麦粉在微观结构上产生淀粉颗粒不规则等变化。发芽也能通过内源蛋白酶以外的酶活性增加，对氨基酸组成产生影响，提升甲硫氨酸和异亮氨酸等必须氨基酸含量，从而提高氨基酸评分。体外模拟消化结果显示，发芽

能显著改善淀粉、蛋白质、脂肪消化特性,从营养角度上看,发芽1 d的裸燕麦具有潜在的功能提升优势。综合以上实验结果,本研究充分证明了发芽是一种改善裸燕麦营养品质的有效方法,对于我国燕麦精深加工具有重要意义。

参考文献:

- [1] 崔江明,周海龙,马利华.发芽、发酵对燕麦营养性及抗氧化性的影响[J].食品科技,2021,46(2):130-134.
- [2] 邵玉芳,苑学霞,邵世勤.浸泡和发芽处理对全籽粒燕麦中蛋白质、氨基酸和矿物质特性的影响[J].粮食与油脂,2017,30(8):75-80.
- [3] 冯媛.加工对燕麦营养品质及消化特性的影响[D].西安:陕西师范大学,2019.
- [4] APARICIO-GARCIA N, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, FRIAS J, et al. Sprouted oat as a potential gluten-free ingredient with enhanced nutritional and bioactive properties[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127972.
- [5] 邵晔.小米发芽过程中淀粉酶系变化及酶活力的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [6] 秦萍.发芽杂粮代餐粉的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
- [7] 姚俊胜,杨波,杨光,等.米糠油乳液的超声制备及其特性[J].上海理工大学学报,2022,44(6):575-582.
- [8] 张俊,胡玲,张三杉,等.不同发芽阶段高粱粉理化及功能特性的变化[J].食品与发酵工业,2021,47(6):68-74.
- [9] 谭杨,陈晓宇,郭文,等.牦牛骨胶原蛋白肽的制备及其抗冻性能研究[J].上海理工大学学报,2020,42(6):550-557.
- [10] GWALA S, PALLARES A P, PÄLCHEN K, et al. *In vitro* starch and protein digestion kinetics of cooked Bambara groundnuts depend on processing intensity and hardness sorting[J]. Food Research International, 2020, 137: 109512.
- [11] 马先红,魏玉玲,李京徽,等.发芽处理对谷物主要成分含量变化的影响[J].保鲜与加工,2021,21(6):145-150.
- [12] NASCIMENTO L A D, ABHILASHA A, SINGH J, et al. Rice germination and its impact on technological and nutritional properties: a review[J]. Rice Science, 2022, 29(3): 201-215.
- [13] 闵维.萌发工艺对燕麦营养品质的影响研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2014.
- [14] 杨鹏.发芽对小米淀粉理化性质的影响[D].武汉:武汉轻工大学,2020.
- [15] 李忍,吴娜娜,李志江,等.发芽全谷物的营养品质及功能特性[J].中国粮油学报,2020,35(12):183-190.
- [16] 张慧,洪雁,顾正彪,等.3种谷物全粉中淀粉的消化性及影响因素[J].食品与发酵工业,2012,38(11):26-31.
- [17] 郭芳.发芽燕麦面包的研制[J].粮食与油脂,2021,34(5):101-103,110.
- [18] 张巧,段振华,陈凤雪,等.浸泡条件对燕麦发芽过程中酶活性的影响[J].食品工业科技,2017,38(21):88-91,306.
- [19] 相玉婷,王晓龙,胡新中,等.燕麦品种间脂肪酶活性差异及低脂肪酶优质品种的预测[J].中国农业科学,2022,55(21):4104-4117.
- [20] 史晓媛.发芽糙米储藏特性研究及其营养粉开发[D].南京:南京农业大学,2012.
- [21] 贺婷.三种处理方式对燕麦理化特性及微生物的影响[D].西安:陕西师范大学,2021.
- [22] ZHANG Y, MA Z M, CAO H W, et al. Effect of germinating quinoa flour on wheat noodle quality and changes in blood glucose[J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101809.
- [23] 邢宝.发芽处理对藜麦淀粉结构和理化性质的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [24] TANG S Y, MAO G, YUAN Y, et al. Optimization of oat seed steeping and germination temperatures to maximize nutrient content and antioxidant activity[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14683.
- [25] 徐丽.富含 γ -氨基丁酸的小米发芽条件优化及特性分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [26] HAN F, HAN F L, WANG Y, et al. Digestible indispensable amino acid scores of nine cooked cereal grains[J]. British Journal of Nutrition, 2019, 121(1): 30-41.
- [27] 杨淑雅,管彤,陆奕成,等.氨基酸均衡谷物营养粉的开发与研究[J].食品与发酵科技,2021,57(5):42-48.
- [28] 王鹏,程志强,祖亿,等.杂粮淀粉体外消化特性的分析[J].食品科技,2017,42(10):170-174.
- [29] 张洁,张根义.燕麦全麦粉中淀粉消化性的研究[J].食品与生物技术学报,2018,37(2):171-178.
- [30] 刘静,李贞,刘海英.浸泡和发芽处理对全籽粒燕麦中糖含量及淀粉体外消化性的影响[J].食品科技,2017,42(1):184-188.
- [31] 梁霞,周柏玲,王海平,等.低升糖藜麦八宝粥的配比优化及其人体GI值测定[J].现代食品科技,2021,37(7):162-168,100.
- [32] JADHAV S B, GAONKAR T, RATHI A. *In vitro* gastrointestinal digestion of proteins in the presence of enzyme supplements: details of antioxidant and antidiabetic properties[J]. LWT, 2021, 147: 111650.
- [33] 徐磊.发芽对薏米营养组成、理化特性及生物活性的影响[D].无锡:江南大学,2017.
- [34] XING B, TENG C, SUN M H, et al. Effect of germination treatment on the structural and physicochemical properties of quinoa starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106604.