麦类作物学报 2026,46(10):1346－1355
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.10.09

网络出版时间:2026-08-20
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260820.1045.010

从营养到防御:青稞氨基酸代谢重塑与高原环境适应

费闹雪[1],曾兴权[2],许从萍[1],巴桑玉珍[2]

(1.武汉轻工大学生命科学与技术学院,湖北武汉 430023; 2.西藏自治区农牧科学院农业研究所,西藏拉萨 850032)

摘 要:青稞是青藏高原地区重要的特色谷类作物,富含蛋白质与多种氨基酸,是重要的功能性食品原料。蛋白质的营养价值高度依赖于氨基酸组成。本文总结了近年来青稞氨基酸的研究进展:(1)在组成与含量方面,青稞含有18种氨基酸,包括8种必需氨基酸,总体呈现总量丰富、比例均衡的特点,赖氨酸为第一限制性氨基酸,不同品种、粒色间氨基酸含量差异显著;(2)在合成与调控方面,概述了主要氨基酸的生物合成途径及分子调控基础;(3)在营养健康功效方面,重点阐述了赖氨酸以及γ-氨基丁酸(GABA)等功能性成分,在支持高原居民适应高代谢、低氧环境方面的潜在作用,包括提供优质蛋白、调节血糖与缓解压力等;(4)在抗逆生理方面,总结了氨基酸代谢,特别是芳香族氨基酸通路,在青稞应对紫外辐射、低温及干旱等高原核心环境胁迫中的关键调控角色;(5)总结了不同加工方式对氨基酸含量、组成及营养效价的影响。

关键词:青稞;氨基酸;营养健康;胁迫响应;加工工艺

中图分类号:S512.3; S330 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)10-1346-10

From Nutrition to Defense: Amino Acid Metabolism Rewiring and Plateau Adaptation of Highland Barley

Fei Naoxue[1], Zeng Xingquan[2], Xu Congping[1], Basang Yuzhen[2]

(1. College of Life Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China;
2. Institute of Agriculture, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, Tibet 850032, China)

Abstract: Highland barley, a characteristic cereal crop widely cultivated on the Qinghai-Tibet Plateau, riched in protein and various amino acids is an important functional food ingredient. The nutritional value of protein highly dependent on its amino acid composition. This paper systematically reviews the research progress on amino acids in highland barley: (1) Regarding composition and content, highland barley contains 18 amino acids, including 8 essential amino acids, generally exhibiting the characteristics of rich total amount and balanced proportions, with lysine being the first limiting amino acid. Significant differences in amino acid content are observed among different varieties and grain colors. (2) Regarding synthesis and regulation, the biosynthetic pathways of major amino acids and their molecular regulatory basis are outlined. (3)Regarding nutritional and health benefits, it focuses on elucidating the potential roles of functional components such as lysine and γ-aminobutyric acid(GABA) in supporting plateau residents' adaptation to high-metabolic and hypoxic environments, including providing high-quality protein, regulating blood glucose, and alleviating stress. (4)Regarding stress physiology, it reveals the key regulatory roles of amino acid metabolism, particularly the aromatic amino acid pathway, in highland barley's response to core plateau environmental stresses such as UV radiation, low temperature, and drought. (5)It summarizes the effects of different processing methods on

收稿日期:2026-03-26 修回日期:2026-06-10
基金项目:西藏自治区科学技术厅基地与人才计划项目(XZ202401JD0027)
第一作者 E-mail:ff18037615357@126.com(费闹雪)
通讯作者 E-mail:alipulan@126.com(巴桑玉珍)

the content, composition, and nutritional value of amino acids.

Keywords: Highland barley; Amino acids; Nutritional health; Stress response; Processing techniques

青稞(*Hordeum vulgare* var. *coeleste* L.)俗称裸大麦，在中国青藏高原地区已有数千年的栽培历史，是藏族人民的主要口粮和特色作物资源。青海和西藏已成为全球最主要的青稞产区，占世界种植面积的 80%以上、产量的近 90%[1-2]。与小麦、玉米、高粱、水稻相比，青稞在蛋白质、膳食纤维、矿物质和维生素含量等方面具有一定优势，而总糖和脂肪含量相对较低，契合当前对“高蛋白、高纤维、高维生素、低脂肪、低糖”膳食结构的需求[3-4]。青稞中已鉴定出多种活性成分，表现出抗氧化[1]、控血糖[2]、护肝[5]、调节肠道健康[6]、抗炎[7]、抗肿瘤[2]等广泛生理功能，因而被视为极具潜力的功能性食品原料。

蛋白质是青稞籽粒中的重要营养组分之一，其含量为 6.35%～23.40%，平均值为 12.43%，该含量低于燕麦和小麦，但高于水稻、玉米等其他常见谷类作物[8]。蛋白质营养价值的高低，不仅取决于含量，更取决于蛋白质的氨基酸组成，包括氨基酸的种类、数量及构成比例。青稞蛋白质中含有 18 种氨基酸，包括人体必需的 8 种氨基酸。因此，系统解析青稞的氨基酸组成与特征，对于科学评价其蛋白质品质、挖掘其健康功效的物质基础具有核心意义。目前，虽然已有研究对青稞氨基酸进行了分析，但结论分散，缺乏系统性的梳理与综合评价。特别是在品种差异、加工影响以及从氨基酸到生物活性肽的深度开发等方面，有待整合与展望。基于此，本文全面归纳青稞氨基酸的组成、含量特征及营养健康功效；梳理主要氨基酸的生物合成途径及分子调控机制；重点探讨氨基酸代谢在青稞适应高原极端环境(如强紫外线、低温、干旱等)过程中所扮演的关键生理角色；评述不同加工方式对青稞氨基酸组成、营养效价及风味的影响，并展望未来青稞氨基酸研究方向，以期为青稞的营养品质改良与高值化开发利用提供系统的理论参考。

1　青稞氨基酸的组成、含量特征

青稞籽粒中已鉴定出 18 种氨基酸，包括赖氨酸(Lys)、苏氨酸(Thr)、蛋氨酸(也称甲硫氨酸，Met)、色氨酸(Trp)、苯丙氨酸(Phe)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)和缬氨酸(Val)8 种人体不能合成的必需氨基酸，总体表现为氨基酸种类较齐全、必需氨基酸占比较高，但不同种质间差异明显。在含量与品种差异方面，不同青稞材料的氨基酸含量存在显著差异，地方品种的各氨基酸含量均高于育成品种，其中有 4 份材料的氨基酸营养价值及风味氨基酸含量均较高[9]；主栽品种的总氨基酸含量变化范围为 7.48%～11.86%，平均含量为 9.18%，必需氨基酸平均含量占总氨基酸的 32.21%[10]。对西藏主栽品种的系统测定显示，籽粒中必需氨基酸占 39.50%，必需氨基酸指数平均值达 0.87，表明青稞蛋白质品质优良，是良好的植物蛋白来源；从具体组成看，谷氨酸(Glu)以 2.07%的平均含量居首，其次为脯氨酸(Pro)与亮氨酸，而酪氨酸(Tyr)、甘氨酸(Gly)及半胱氨酸(Cys)含量相对较低[11]。进一步研究发现，青稞蛋白质的第一限制性氨基酸为赖氨酸，苏氨酸次之，其游离氨基酸的呈味特性表现为鲜味氨基酸＞苦味氨基酸＞甜味氨基酸，谷氨酸是最主要的呈味氨基酸，组氨酸(His)、缬氨酸、精氨酸(Arg)和半胱氨酸对青稞的滋味亦有贡献，且不同产地青稞的 17 种游离氨基酸含量存在显著地域差异[12]。此外，籽粒颜色作为重要的品种特征，其与氨基酸含量的关系也受到关注。如黑青稞 18 种氨基酸齐全，总量为 11.44%，8 种人体必需氨基酸总量为 3.55%，其中脯氨酸和谷氨酸含量最高，分别为 3.00%和 1.36%，且其氨基酸总量及缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸、酪氨酸、脯氨酸含量均显著高于白青稞[13]；不同粒色品种比较发现，蓝色青稞蛋白中必需氨基酸比例最高，其氨基酸组成与 WHO/FAO 推荐的氨基酸模式最为接近。进一步比较发现，有色青稞的必需氨基酸含量高于黄色青稞，黑色青稞的蛋白营养价值相对更优[14]。

2　青稞氨基酸的合成途径与代谢调控

青稞氨基酸的合成与代谢构成一个复杂的网络(图 1)，其生物合成始于氮同化过程，在谷氨酸脱氢酶(glutamate dehydrogenase, GDH)、谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)、谷氨酸

合酶(glutamate synthase，又称谷氨酰胺-α-酮戊二酸氨基转移酶，GOGAT)等核心酶的作用下，无机氮转化为谷氨酸，谷氨酸则在谷氨酸-草酰乙酸转氨酶(glutamate oxaloacetate transaminase，GOT，也称天冬氨酸转氨酶，aspartate transaminase，AST)、谷丙转氨酶(glutamate pyruvate transaminase，GPT，又称丙氨酸转移酶，alanine aminotransferase，ALT)等转氨酶的催化作用下转化为天冬氨酸、丙氨酸等其他氨基酸[15-17]。依据其合成代谢途径或碳骨架来源分为谷氨酸族、天冬氨酸族、丙氨酸族、丝氨酸族、芳香族氨基酸以及支链氨基酸的合成途径。天冬氨酸族氨基酸包括赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸和异亮氨酸，均以天冬氨酸为起始物。对青稞籽粒发育过程的转录组分析表明，在两个青稞地方品种中，差异表达基因显著富集于天冬氨酸族氨基酸的生物合成与降解途径，这凸显了该家族代谢在籽粒发育中的核心地位[18]。此外，天冬氨酸族氨基酸特别是赖氨酸的合成与调控因其在营养品质中的关键作用而备受关注[19-22]。研究发现，植物中赖氨酸的生物合成需要二氢吡啶二羧酸合成酶(DHDPS)，而赖氨酸的降解则由双功能的赖氨酸酮戊二酸还原酶/酵母氨酸脱氢酶(LKR/SDH)催化[23-24]。

芳香族氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸)的合成起始于莽草酸途径，其前体物质磷酸烯醇式丙酮酸和赤藓糖-4-磷酸经该途径转化为分支酸。在青稞中，这一基础合成途径的产物苯丙氨酸的代谢流向受到多层次调控，是连接初级代谢与复杂环境适应的关键节点。研究表明，催化苯丙氨酸分解的苯丙氨酸解氨酶(PAL)在这一调控过程中具有重要作用。对青稞中 *PAL* 基因的克隆和表达分析显示，该基因含有典型的植物苯丙氨酸解氨酶活性中心保守氨基酸序列，与大麦、小麦相似性达 90%，且 *HvPAL* 在 Co^{2+} 胁迫下表达显著上调，与谷胱甘肽(GSH)、吡咯啉-5-羧酸合成酶(P5CS)等抗氧化相关成分协同上调，共同清除活性氧，增强青稞对重金属的耐受性[25]。此外，多项研究显示，苯丙氨酸及其苯丙烷代谢通路在青稞抵御紫外辐射[26]、低温[27]、重金属胁迫[25,28]、病害[29]及调控籽粒色泽中[30]均发挥核心作用，是青稞高原适应性育种的重要分子靶标。

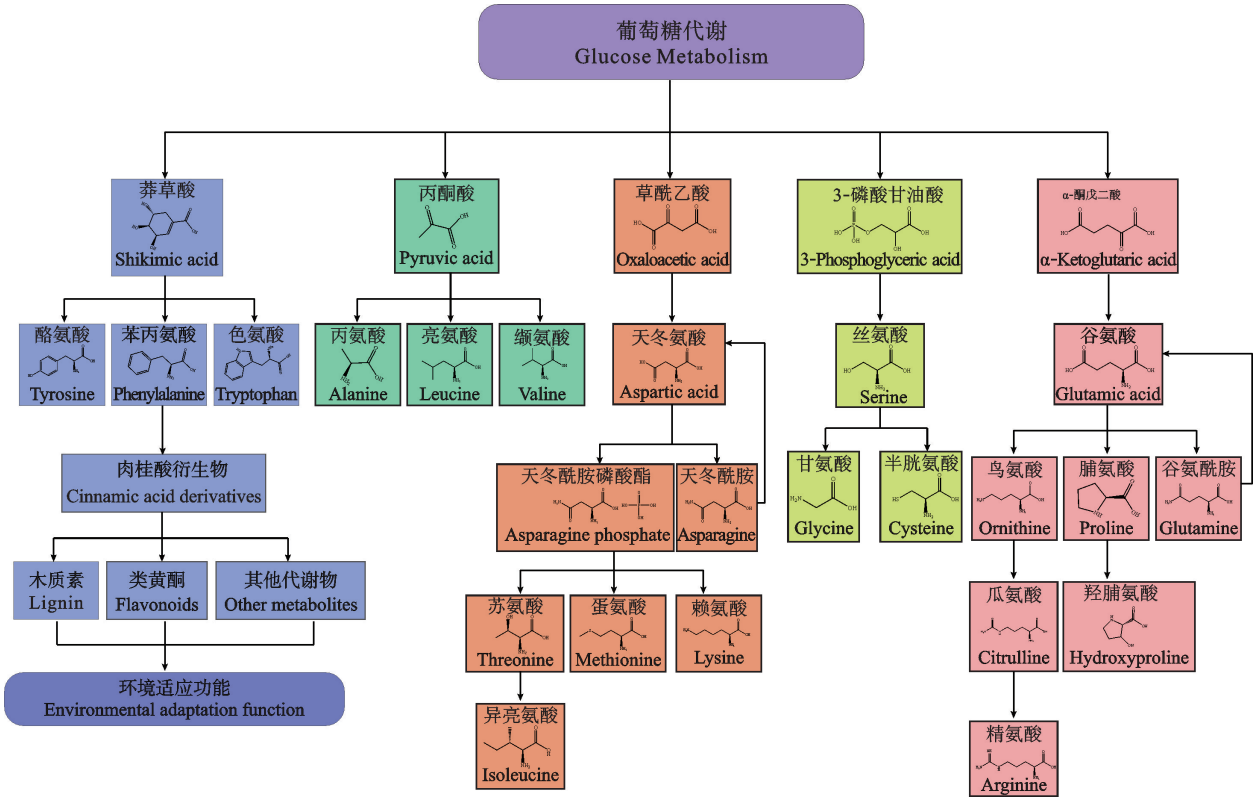


图 1 青稞氨基酸合成与代谢途径

Fig. 1 Synthesis and metabolic pathways of amino acids in highland barley

3　青稞氨基酸营养健康功效

青稞氨基酸均衡、优质的组成特征,是其发挥多种营养健康功效、进而为高原居民膳食蛋白质供给和代谢健康提供营养支持。具体而言,青稞中丰富且均衡的必需氨基酸为高原居民的高代谢需求提供了优质的蛋白质来源,尤其富含大多数谷物中缺乏的赖氨酸,其平均含量可达 0.45 g·(100 g)$^{-1}$[31],显著高于小麦、玉米、粳米等主粮[32],能够在低氧、高寒环境下为高原居民提供更易被利用的氮源。赖氨酸具有促进机体生长发育、参与能量代谢、促进矿物质吸收和骨骼生长、增强免疫功能、治疗单纯疱疹病毒感染、减轻焦虑等功能[33]。在高原环境中,青稞中的赖氨酸通过以下生理机制为居民适应提供营养支持:作为肉碱合成前体参与脂肪酸氧化供能,有助于维持能量代谢稳态[34];增强肠道钙吸收与肾脏钙保留,为骨骼健康提供营养基础[35];参与免疫球蛋白合成与免疫细胞活化,支持免疫功能[36];此外,在神经调节方面,赖氨酸与精氨酸协同作用可能降低应激激素水平,从而对缓解高原环境引发的心理压力具有潜在益处[37]。值得注意的是,赖氨酸直接促进人类高原适应的特异性研究尚待深入,现有青稞整体干预研究已证实其可改善缺氧条件下的能量代谢与缺氧耐受[38],提示青稞中的赖氨酸等活性成分可能协同促进高原适应。

除了赖氨酸这类必需氨基酸外,青稞中还富含多种具有生理调节功能的非蛋白质氨基酸,其中 γ-氨基丁酸(GABA)尤为突出。GABA 是一种四碳非蛋白水溶性氨基酸($C_4H_9NO_2$),以游离氨基酸形式广泛存在于原核生物和真核生物中[39-40]。GABA 在青稞籽粒中广泛分布,且含量受品种、产地、生长环境及加工方式的显著影响。研究显示,青藏高原裸大麦籽粒 GABA 平均含量为 19.00 mg·(100 g)$^{-1}$,显著高于国外引进品种,深色籽粒(尤其是紫色)GABA 含量普遍高于浅色籽粒[41];发芽处理可显著富集 GABA,在适宜条件下,青稞发芽过程中 GABA 呈先升后降趋势,但总体含量高于未发芽籽粒[42-44]。在发芽基础上施加低温胁迫可高效富集 GABA[44-45]。富集的 GABA 通过多重生理功能,对机体健康产生一系列积极影响。研究表明,GABA 作为一种重要的抑制性神经递质,能够通过调节神经信号传导来帮助缓解压力、改善情绪并促进睡眠,这对于应对高原环境下的心理应激具有潜在价值[46-47]。在心血管健康方面,GABA 还参与调节功能,有助于维持血压的稳定[48-49]。此外,青稞中的 GABA 还具有显著的体外降血糖活性。孙康娜等[50]的研究证实,从黑青稞中优化提取的 GABA 对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率分别可达 72.41%和 82.29%,表明其能有效延缓碳水化合物在肠道的消化吸收,从而有助于维持餐后血糖稳定。这一功能对于能量需求高、饮食相对单一的高原居民而言,有助于实现持久的能量平稳释放。

4　氨基酸在青稞逆境胁迫中的作用

青稞主要分布于青藏高原及其周边高海拔地区,核心种植区的海拔通常在 2 500 m 至 4 500 m 之间,部分区域可达 4 800 m[51]。这一生长环境使其暴露于一系列严酷的环境胁迫之下。强紫外线(UV-B)辐射是其中之一,由于海拔较高,其生长环境中的 UV-B 辐射强度可比同纬度平原地区高出 50%～100%,对植株造成直接的氧化损伤。同时,当地气候寒冷,生长季平均气温仅为 3～10 ℃,夜间温度常接近冰点,使青稞在生长季内面临低温和霜冻风险。此外,高原上降水分布不均且蒸发量大,干旱是主要的非生物胁迫之一,而部分地区土壤的盐碱化问题则与干旱胁迫相互叠加。这些逆境因子共同构成了青稞生长的主要环境约束。面对这些逆境胁迫,氨基酸作为关键的生理代谢物质,在青稞的抗逆体系中发挥核心作用(图 2)。

在紫外胁迫下,青稞可通过调整代谢网络,特别是芳香族氨基酸的合成与转化通路,来启动系统性的防御反应[26]。具体而言,在 UV-B 辐射下,青稞幼苗的代谢谱分析显示,精氨酸、酪氨酸等氨基酸的含量显著上调,且“苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸生物合成”、“精氨酸和脯氨酸代谢”以及“色氨酸代谢”等 KEGG 通路被显著激活。这些氨基酸的积累为抗逆代谢提供了重要前体,并直接参与苯丙烷代谢的调控,进而促进下游酚酰胺类物质的生成。这些结果显示,青稞通过强化上游氨基酸供给,系统性协调下游防御网络,以适应高原强紫外环境。在冻害胁迫下,青稞同样依赖氨基酸代谢的重塑。Xu 等[27]研究发现,耐冷品种特异性激活苯丙氨酸、色氨酸代谢等通路,显著积累多种氨基酸。这些氨基酸不仅作为渗透调节剂稳定细胞,缓解冰冻脱水损伤,更是甘油磷脂与苯丙烷代谢等抗冻网络重组的关键前体。该代谢



本示意图概括了关键氨基酸及其下游通路在青稞适应高原逆境中的作用机制。当青稞受到非生物胁迫(如 UV-B 辐射、冻害、干旱及盐碱胁迫)以及生物胁迫(如白粉病侵染)时,其体内氨基酸代谢首先发生显著变化,进而触发下游相关通路的代谢物富集。这些特异性积累的代谢物最终协同增强青稞对高原多种逆境胁迫的整体适应能力。

This schematic diagram summarizes the role of key amino acids and their downstream pathways in the adaptation of highland barley to plateau environmental stresses. When subjected to abiotic stresses, such as UV-B radiation, freezing, drought, and salt stress, as well as biotic stresses such as powdery mildew infection, the amino acid metabolism in highland barley is primarily altered. This change subsequently drives the enrichment of metabolites in related downstream pathways. The specific accumulation of these metabolites ultimately contributes to enhancing the overall adaptive capacity of highland barley to multiple adversities in high-altitude environments.

图 2 青稞响应高原逆境的氨基酸代谢调控网络

Fig. 2 Amino acid metabolic regulatory network of highland barley in response to plateau stresses

响应与 HvCBF10A 等转录因子调控网络协同,有助于增强青稞低温耐受性。此外,在干旱胁迫下,青稞通过重编程氨基酸代谢增强抗性。耐旱品种中,苯丙氨酸显著积累,该氨基酸通过调控其代谢流向,驱动下游抗氧化物质增加,从而有效清除活性氧。同时,色氨酸代谢变化与生长素水平上升相关联。这表明氨基酸不仅是渗透调节物质,更是抗旱次生代谢网络重组的关键调控节点[52]。在盐碱胁迫下,氨基酸也发挥关键调控作用。代谢组学研究表明,盐胁迫使青稞叶片中超过半数的代谢物积累发生改变,其中氨基酸及其衍生物的响应尤为显著。研究进一步鉴定出包括 L-色氨酸、L-苯丙氨酸在内的 13 种核心胁迫响应代谢物,凸显了氨基酸在信号传导与生理调节中的核心地位;耐盐品种展现出明显的时序性代谢重编程策略,胁迫早期通过抑制部分代谢以节约能量,

持续胁迫阶段则转向增强氨基酸合成、能量生产及渗透调节物质的积累,以维持离子与代谢稳态[53]。基因表达分析表明,盐胁迫可诱导 *PAL* 等基因上调,从而激活苯丙烷代谢途径,并为下游抗逆产物的积累提供前体[54]。

在应对生物胁迫,尤其是由大麦专化型白粉菌(*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*)引起的白粉病,青稞同样展现出以氨基酸代谢为基础的系统性防御。针对西藏青稞抗白粉病的广泛靶向代谢组研究显示,抗病青稞叶片中氨基酸合成途径被整体激活,尤其是色氨酸代谢途径被显著激活[55]。品种间比较进一步表明,高抗品种(K69)与感病品种(G72)在白粉菌侵染后的代谢模式存在显著差异。抗病品种在侵染后 24 h 特异性地大量积累芳香族酚胺,功能验证实验进一步证实,外源喷施芳香族酚胺能显著增强青稞对白粉菌侵染的抵御能力,芳香族酚胺等氨基酸衍生物是青稞抗白粉病的重要效应代谢物[29,56]。

5　不同加工方式对青稞氨基酸的影响

青稞的加工过程会显著改变籽粒的物理结构、化学成分及生物活性物质的含量与状态,氨基酸作为重要的营养成分和风味前体物质,其含量、组成、消化利用率及风味贡献均可能发生变化。薛婉玉等[57]研究发现,蒸煮与碾磨组合使疏水性氨基酸(如亮氨酸、异亮氨酸)在不可消化残渣中富集,导致必需氨基酸评分下降,但适度碾磨又能因淀粉基质破坏而部分恢复蛋白质消化率;分层碾磨进一步揭示,越靠近种皮的外层麸皮(F-1、F-2),其赖氨酸、缬氨酸等必需氨基酸含量及氨基酸评分反而高于胚乳中心,提示“精白”程度越高,氨基酸损失越大[58]。在挤压膨化加工方式下,青稞的氨基酸变化呈现品种特异性。张晓梅等[59]研究表明,黑青稞在挤压后完全氨基酸与游离氨基酸总量均下降,而藏青 320 和藏青 2000 则表现为完全氨基酸总量上升、游离氨基酸总量下降。然而,无论处理前还是处理后,3 种青稞的必需氨基酸评分均显示其无法完全满足各年龄段人群的需求,尤其对 0～3 岁婴幼儿存在明显不足。在微生物发酵方面,红曲霉发酵可显著提高青稞总氨基酸含量,并增加 γ-氨基丁酸等功能性成分[60];青稞酒发酵过程中,非必需氨基酸占比虽高,但发酵后必需氨基酸比例显著升高,这可能与微生物代谢、蛋白质水解及不同氨基酸消耗速率差异有关[61];多菌种发酵也能产生丰富的氨基酸,但蛋氨酸缺乏是共性问题,且发酵时间对氨基酸积累影响关键,在相关研究所采用的发酵体系中,60～72 h 通常为风味和氨基酸含量较佳的发酵时间[62]。

6　结论与展望

青稞作为青藏高原特有的功能性谷物,其氨基酸组成与营养价值的研究已取得一系列进展。青稞氨基酸种类较齐全,必需氨基酸占比较高,是优质的植物蛋白来源。赖氨酸虽为限制性氨基酸之一,但其含量相对部分主粮具有一定优势。研究同时聚焦于 γ-氨基丁酸等功能性氨基酸的富集机制与健康功效,揭示了其在调节血糖、缓解压力等方面的潜力。尤为重要的是,氨基酸代谢参与青稞对紫外、低温、干旱等高原逆境的响应过程。此外,不同的加工方式会显著影响氨基酸的保留与效价,提示在实际应用中需优化工艺以最大化其营养价值。然而,当前研究仍存在一些不足和挑战,未来可以从以下方向深化探索:

(1)深入解析氨基酸代谢的分子调控网络:尽管青稞氨基酸的合成途径已得到初步阐明,但关键酶基因的克隆、表达调控及代谢网络互作机制尚不清晰。未来应整合全基因组关联分析、转录组学、蛋白组学与广泛靶向代谢组学,系统挖掘并解析这些关键基因在籽粒发育、逆境响应及营养品质形成中的时空表达特征与调控网络。对于苯丙氨酸代谢,应进一步阐明其与低温、重金属及病原胁迫信号之间的调控关系,以及其与花青素、酚酰胺等次生代谢物积累的交叉调控机制,揭示初级代谢与次级代谢的联动规律。在此基础上,借鉴水稻[63]、玉米[64]等作物的成熟经验,优先开展青稞赖氨酸代谢关键基因(如 LKR/SDH)的同源克隆与功能表征,评估通过 CRISPR/Cas9 或 RNAi 技术抑制其降解途径、或利用标记辅助选择富集天然高赖氨酸种质的可行性,为青稞营养品质改良提供新的分子设计策略。

(2)强化功能性氨基酸 GABA 的研究与开发:GABA 作为青稞中重要的功能性氨基酸,其富集工艺已得到优化,但合成关键酶的遗传基础与调控机制仍研究不足。在种质资源层面,尚未系统评价不同生态区及不同颜色(白、紫、黑)青稞种质的 GABA 富集潜力,遗传背景与含量关系不明;在生理分子机制层面,低温、低氧等逆境信号

如何传递至 GAD 的转录与翻译后修饰尚不清晰，关键转录因子调控细节有待阐明，且 GABA 分解关键基因（如 *HvGABA-T*、*HvSSADH*）的功能仍未在青稞中克隆验证；在功能评价方面，现有降血糖、抗氧化等证据多源于体外实验，缺乏动物模型及人群干预研究，难以确定有效剂量、生物利用度及相关生物标志物。因此，未来需从遗传机制、代谢调控、体内功能等多维度开展系统研究，推动青稞 GABA 从工艺优化走向机制解析与产品实证，最终实现其健康功能的科学确认与高值化应用。

（3）加工工艺的优化与营养保留技术创新：现有加工方式存在氨基酸损失、消化利用率不足、营养不均衡等问题，需针对性开展工艺创新。近红外光谱检测、智能传感等现代检测技术已在小麦[65]、水稻[66]、玉米[67]和高粱[68]等多种作物中被成功用于构建籽粒中氨基酸的空间分布图谱，并据此指导智能碾磨设备实现靶向碾磨。青稞籽粒亦可借鉴该技术路径，通过建立自身的氨基酸分布图谱，实现精准化、营养导向的智能碾磨加工。在此基础上，还应进一步创新发酵工艺，例如优化菌种组合（如红曲霉、乳酸菌与酵母菌的复合发酵），并补充蛋氨酸等限制性氨基酸前体物质，以缩短发酵周期并有效提高氨基酸总量与功能性成分含量。同时，面向婴幼儿等特殊人群的营养需求，可通过配方优化（如与富含蛋氨酸、赖氨酸的原料复配）及加工技术改良，开发出满足特定营养需求的青稞制品，不断拓宽其在高附加值食品领域的应用场景。

参考文献：

[1]Guo T L, Horvath C, Chen L, *et al*. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 103: 109.

[2]Obadi M, Sun J, Xu B. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, healtheffects, and applications [J]. *Food Research International*, 2021, 140: 110065.

[3]苟国源，贾 琅，李苓蕾，等. 不同品种青稞的品质特性及其对血糖生成指数的影响[J]. 食品工业科技，2025，46(23)：310.
Gou G Y, Jia L, Li L L, *et al*. Quality characteristics of different varieties of highland barley and their impact on glycemic index [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(23): 310.

[4]杨应亮，杨希娟. 碾减率对青稞米营养品质的影响[J]. 青海农林科技，2024(2)：68.
Yang Y L, Yang X J. Effect of degree of milling on the nutritional quality of highland barley rice [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2024(2): 68.

[5]Liu H C, Chen T, Xie X Q, *et al*. Hepatic lipidomics analysis reveals the ameliorative effects of highland barley β-glucan on western diet-induced nonalcoholic fatty liver disease mice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32): 9287.

[6]Yu Y K, Zhang K, Zhang D D, *et al*. Highland barley β-glucan relieves symptoms of colitis *via* PPARα-mediated intestinal stem cell proliferation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(44): 24359.

[7]Nie C, Wang B, Fan M C, *et al*. Highland barley tea polyphenols extract alleviates skeletal muscle fibrosis in mice by reducing oxidative stress, inflammation, and cell senescence [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(1): 739.

[8]刘新红. 青稞品质特性评价及加工适宜性研究[D]. 西宁：青海大学，2014：1.
Liu X H. Study on quality evaluation and processing suitability of hulless barley [D]. Xining: Qinghai University, 2014: 1.

[9]翟会生，李 俏，张玉红，等. 72 份青稞氨基酸组成与营养价值评价[J]. 植物遗传资源学报，2021，22(1)：121.
Zhai H S, Li Q, Zhang Y H, *et al*. Evaluation of the amino acids composition and nutrition value of 72 hulless barley [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 121.

[10]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.
Hou D Z, Shen Q. Analysis of nutrition and functional components of 29 kinds of highland barley in China [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(2): 289.

[11]靳玉龙. 西藏不同品种青稞的氨基酸组成及营养价值评价[J]. 粮食与油脂，2023，36(12)：125.
Jiny L. Amino acid composition and nutritional value evaluation of different varieties of highland barley in Tibet [J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(12): 125.

[12]徐禄尧，李 君，党 斌. 青海不同产地青稞氨基酸组成及营养价值评价[J]. 青海农林科技，2025(2)：1.
Xu L Y, Li J, Dang B. Amino acid composition and nutritional value evaluation of highland barley from different habitats [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2025(2): 1.

[13]梁寒峭，李金霞，陈建国，等. 黑青稞营养成分的检测与分析[J]. 食品与发酵工业，2016，42(1)：180.
Liang H Q, Li J X, Chen J G, *et al*. Determination and analysis of nutrient ingredients of black hulless barley [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(1): 180.

[14]杨希娟. 不同粒色青稞营养品质评价[J]. 青海农林科技，2023(4)：58.
Yang X J. Evaluation of nutritional quality of highland barley with different grain colors [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2023(4): 58.

[15]方嘉琪,赵 妍,周青平,等. 低氮胁迫下作物谷氨酰胺合成酶—谷氨酸合成酶循环的研究进展[J]. 草业科学,2025,42(4):1036.
Fang J Q, Zhao Y, Zhou Q P, *et al*. Research progress on crop GS-GOGAT cycle under low nitrogen stress [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(4): 1036.

[16]Liu X J, Hu B, Chu C C. Nitrogen assimilation in plants: Current status and future prospects [J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2022, 49(5): 394.

[17]Mellis A T, Misko A L, Arjune S, *et al*. The role of glutamate oxaloacetate transaminases in sulfite biosynthesis and H_2S metabolism [J]. *Redox Biology*, 2021, 38: 101800.

[18]Chen X, Long H, Gao P, *et al*. Transcriptome assembly and analysis of Tibetan hulless barley(*Hordeum vulgare* L. var. nudum) developing grains, with emphasis on quality properties [J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e98144.

[19]陈丽娟,闫春梅. 甘肃大麦地方品种蛋白质赖氨酸淀粉含量分析[J]. 甘肃农业科技,1999,30(12):15.
Chen L J, Yan C M. Analysis of lysine starch content in protein, a local barley variety in Gansu Province [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 1999, 30(12): 15.

[20]何玉婷,扎西群措,何俊洁,等. 西藏地区 30 份青稞籽粒营养品质分析和综合评价[J]. 西藏农业科技,2022,44(2):8.
He Y T, Zha X, He J J, *et al*. Nutritional quality analysis and comprehensive evaluation of 30 highland barley grains in Tibet [J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 44(2): 8.

[21]丁双鲲,杜 恺,袁增慧,等. 赖氨酸对青稞面包品质及风味特征的影响[J]. 食品与发酵工业,2023,49(7):256.
Ding S K, Du K, Yuan Z H, *et al*. Effects of lysine on quality and flavor characteristics of highland barley bread [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(7): 256.

[22]冯西博,王建林,钟志明,等. 青藏高原青稞赖氨酸含量空间分布及其与环境因子的关系[J]. 核农学报,2017,31(7):1388.
Feng X B, Wang J L, Zhong Z M, *et al*. Spatial distribution of lysine content in highland barley and its relationship with environmental factors in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(7): 1388.

[23]Galili G. Regulation oflysine and threonine synthesis [J]. *The Plant Cell*, 1995, 7(7): 899.

[24]杨建昌,李超卿,江 贻. 稻米氨基酸含量和组分及其调控[J]. 作物学报,2022,48(5):1037.
Yang J C, Li C Q, Jiang Y. Contents and compositions of amino acids in rice grains and their regulation: A review [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(5): 1037.

[25]乔 枫,张 丽,耿贵工,等. $CoCl_2$ 胁迫下青稞苯丙氨酸解氨酶基因的克隆与表达分析[J]. 中国农业大学学报,2021,26(3):18.
Qiao F, Zhang L, Geng G G, *et al*. Cloning and expression of phenylalanine ammonialyase gene of *Hordeum vulgare* var nudum under $CoCl_2$ stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(3): 18.

[26]Zeng X Q, Yuan H J, Dong X K, *et al*. Genome-wide dissection of co-selected UV-B responsive pathways in the UV-B adaptation of Qingke [J]. *Molecular Plant*, 2020, 13(1): 112.

[27]Xu C P, Gui Z H, Huang Y X, *et al*. Integrated transcriptomics and metabolomics analyses provide insights into Qingke in response to cold stress [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(47): 18345.

[28]乔 枫,贺 杰,耿贵工,等. 铬胁迫下青稞幼苗生理指标和苯丙氨酸解氨酶基因表达的变化[J]. 分子植物育种,2020,18(24):8255.
Qiao F, He J, Geng G G, *et al*. Changes of physiological indexes and phenylalanine ammonia lyase gene expression in hullessbarley seedlings under cesium stress [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(24): 8255.

[29]Xu C P, Zhan C S, Huang S S, *et al*. Resistance to powdery mildew in Qingke involves the accumulation of aromatic phenolamides through jasmonate-mediated activation of defense-related genes [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 900345.

[30]Xu C P, Abbas H M K, Zhan C S, *et al*. Integrative metabolomic and transcriptomic analyses reveal the mechanisms of Tibetan hulless barley grain coloration [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1038625.

[31]刘美池,邓 敫,刘新春,等. 青稞种质资源籽粒赖氨酸含量的评价[J]. 大麦与谷类科学,2023,40(5):8.
Liu M C, Deng X, Liu X C, *et al*. Evaluation of Lysine Content in grains of highland barley germplasm resources [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2023, 40(5): 8.

[32]刘婷婷,邢青斌,程家丽,等. 青稞中氨基酸含量的测定分析及评价[J]. 卫生研究,2019,48(2):284.
Liu T T, Xing Q B, Cheng J L, *et al*. Determination of amino acids in Hulless barley [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2019, 48(2): 284.

[33]田 颖,时明慧. 赖氨酸生理功能的研究进展[J]. 美食研究,2014,31(3):60.
Tian Y, Shi M H. The research progress of the physiologic functions of lysine [J]. *Journal of Researches on Dietetic Science and Culture*, 2014, 31(3): 60.

[34]Longo N, Frigeni M, Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 2016, 1863(10): 2422.

[35]Civitelli R, Villareal D T, Agnusdei D, *et al*. Dietary L-lysine and calcium metabolism in humans [J]. *Nutrition*, 1992, 8(6): 400.

[36]Li P, Yin Y L, Li D F, *et al*. Amino acids and immune function [J]. *British Journal of Nutrition*, 2007, 98(2): 237.

[37]Daniela J, Aikaterini M, Miro S, *et al*. Subchronic treatment with amino acid mixture of L-lysine and L-arginine modifies neuroendocrine activation during psychosocial stress in subjects with high trait anxiety [J]. *Nutritional Neuroscience*,

2005,8(3):155.

[38]Zhao L X,Sang L M,Liu Y,*et al*. Effects of dietary highland barley at different inclusion levels on normobaric hypoxia tolerance,oxidative stress,energy metabolism,and gut microbiota in mice [J]. *Nutrients*,2026,18(4):659.

[39]Wang Y H,Xiong F,Nong S H,*et al*. Effects of nitric oxide on the GABA, polyamines, and proline in tea (*Camellia sinensis*) roots under cold stress [J]. *Scientific Reports*, 2020,10:12240.

[40]Yuan H N,Wang H B,Fidan O,*et al*. Identification of new glutamate decarboxylases from *Streptomyces* for efficient production of γ-aminobutyric acid in engineered *Escherichia* coli [J]. *Journal of Biological Engineering*,2019,13(1): 24.

[41]曹 斌,潘志芬,尼玛扎西,等.青藏高原和国外裸大麦 γ-氨基丁酸的含量与分布[J].麦类作物学报,2010,30(3):555.
Cao B,Pan Z F,Ni M Z X,*et al*. Distribution of γ-aminobutytric acid in the grains of naked barley collected from Qinghai-Tibet Plateau and abroad [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2010,30(3):555.

[42]张伊迪.青稞发芽过程中营养成分含量变化的研究[D].上海:上海交通大学,2016.
Zhang Y D. Exploration of content change of several nutritional ingredients in germination process of highland barley [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2016.

[43]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.
Li T Y,Du Y,Chen Z H,*et al*. Effects of highland barley seed germination under stress on contents of β-glucan and γ-aminobutyric acid [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*,2021,36(6):30.

[44]Al-Ansi W,Ali Mahdi A,Ali Al-Maqtari Q,*et al*. The potential improvements of naked barley pretreatments on GABA, β-glucan,and antioxidant properties [J]. *LWT*, 2020, 130: 109698.

[45]路 静,白术群,郑学玲,等.低温胁迫萌芽对青稞 γ-氨基丁酸合成的调控作用研究[J].食品研究与开发,2024,45(11): 72.
Lu J,Bai S Q,Zheng X L,*et al*. Regulation of γ-aminobutyric acid synthesis in highland barley by low-temperature stress germination [J]. *Food Research and Development*,2024,45 (11):72.

[46]李铁梅,王彦香,简文秀,等.青稞的生物活性成分及其对代谢健康的作用[J].食品与营养科学,2024,13(4):398.
Li T M,Wang Y X,Jian W X,*et al*. Bioactive compounds of highland barley and their effects on metabolic health [J]. *Hans Journal of Food and Nutrition Science*,2024,13(4): 398.

[47]吴雨晴,张佳琪,范 蓓,等.加工对青稞营养成分及生物活性影响的研究进展[J].食品工业科技,2024,45(5):8.
Wu Y Q,Zhang J Q,Fan B,*et al*. Research progress on the effects of processing on nutrients and biological activity of highland barley [J]. *Science and Technology of Food Industry*,2024,45(5):8.

[48]Lim D Y,Suh J,Yoo H J,*et al*. Influence of gamma-aminobutyric acid on the changes of blood pressure in rats [J]. *The Korean Journal of Internal Medicine*,1990,5(1):23.

[49]杜 艳,梁 锋,李婷玉,等.发芽青稞的营养品质及降血压效果[J].食品与生物技术学报,2023,42(7):44.
Du Y,Liang F,Li T Y,*et al*. Nutritional quality and antihypertensive effect of sprouted highland barley [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*,2023,42(7):44.

[50]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.
Sun K N,Ding H Y,Li Y,*et al*. Extraction process optimization of γ-aminobutyric acid in black highland barley and its hypoglycemic activity *in vitro* [J]. *Food Research and Development*,2024,45(4):127.

[51]Liu Y J,Zhang E M,Pan T,*et al*. Anthropogenic adaptation measures expand suitable area for highland barley in Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*,2025,70(9):1504.

[52]Xu C P,Wei L L,Huang S S,*et al*. Drought resistance in Qingke involves a reprogramming of the phenylpropanoid pathway and UDP-glucosyltransferase regulation of abiotic stress tolerance targeting flavonoid biosynthesis [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69 (13): 3992.

[53]Wang Y L,Zeng X Q,Xu Q J,*et al*. Metabolite profiling in two contrasting Tibetan hulless barley cultivars revealed the core salt-responsive metabolome and key salt-tolerance biomarkers [J]. *AoB Plants*,2019,11(2):plz021.

[54]Xue Z L,Wang B S,Qu C Y,*et al*. Response of salt stress resistance in highland barley(*Hordeum vulgare* L. var. nudum) through phenylpropane metabolic pathway [J]. *PLoS One*,2023,18(10):e0286957.

[55]魏玲玲,旺 姆,曾兴权.西藏青稞抗白粉病的广泛靶向代谢组研究[J].高原农业,2020,4(3):239.
Wei L L,Wangmu,Zeng X Q. A wide range of targeted metabolome studies on resistance to powdery mildew in Qingke barley [J]. *Journal of Plateau Agriculture*,2020,4 (3):239.

[56]黄昱箫,黄思曙,占传松,等.代谢组分析青稞芳香族酚胺响应白粉病胁迫[J].麦类作物学报,2024,44(8):1019.
Huang Y X,Huang S S,Zhan C S,*et al*. Metabolome analysis of the response of barley aromatic phenolamides to powdery mildew stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2024,44 (8):1019.

[57]薛婉玉,付璐璐,李 博.蒸煮和碾磨对青稞全谷物食品中蛋白质营养的影响及机制[J].食品工业科技,2026,47(1): 139.
Xue W Y,Fu Ll,Li B. Effects and mechanisms of cooking and milling on protein nutrition in whole grain highland barley foods [J]. *Science and Technology of Food Industry*,

2026,47(1):139.

[58]赵萌萌,党 斌,张文刚,等.青稞分层碾磨中各层粉体的营养及功能成分的分布差异[J].食品科学技术学报,2021,39(6):98.
Zhao M M,Dang B,Zhang W G,*et al*. Distribution difference of nutrients and functional components of various powders in milling layer of highland barley by stratified milling [J]. *Journal of Food Science and Technology*,2021,39(6):98.

[59]张晓梅,姜铁民,刘 妍,等.挤压膨化对西藏青稞中氨基酸组分含量的影响分析[J].食品科技,2019,44(7):218.
Zhang X M,Jiang T M,Liu Y,*et al*. Effect of extrusion on the amino acid composition of Tibetan hulless barley [J]. *Food Science and Technology*,2019,44(7):218.

[60]万 强,刘 敏,陈兴鹏,等.青稞红曲品质及质量分析初探[J].食品科技,2013,38(9):267.
Wan Q,Liu M,Chen X P,*et al*. The quality analysis of highland barley *Monascus* [J]. *Food Science and Technology*,2013,38(9):267.

[61]姜 欣,江 伟,谢三款,等.青稞品种对青稞发酵酒营养与感官品质的影响[J].食品科学,2023,44(5):38.
Jiang X,Jiang W,Xie S K,*et al*. Influence of highland barley varieties on the nutritional and sensory quality of highland barley wine [J]. *Food Science*,2023,44(5):38.

[62]曹 妍,杜木英,阚建全,等.多菌种发酵青稞酒化学成分变化研究[J].食品科学,2012,33(11):252.
Cao Y,Du M Y,Kan J Q,*et al*. Changes in chemical components during fermentation of highland barley wine with multi-strain starter [J]. *Food Science*,2012,33(11):252.

[63]Kawakatsu T,Takaiwa F. Differences in transcriptional regulatory mechanisms functioning for free lysine content and seed storage protein accumulation in rice grain [J]. *Plant and Cell Physiology*,2010,51(12):1964.

[64]Houmard N M,Mainville J L,Bonin C P,*et al*. High-lysine corn generated by endosperm-specific suppression of lysine catabolism using RNAi [J]. *Plant Biotechnology Journal*,2007,5(5):605.

[65]Chadalavada K,Anbazhagan K,Ndour A,*et al*. NIR instruments and prediction methods for rapid access to grain protein content in multiple cereals [J]. *Sensors*,2022,22(10):3710.

[66]Xie L H,Tang S Q,Wang X Q,*et al*. Simultaneously determining amino acid contents using near-infrared reflectance spectroscopy improved by pre-processing method in rice [J]. *LWT*,2023,188:115317.

[67]Qiao M M,Cui T,Xia G Y,*et al*. Integration of spectral and image features of hyperspectral imaging for quantitative determination of protein and starch contents in maize kernels [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2024,218:108718.

[68]Wu K,Zhang Z L,He X H,*et al*. Using visible and NIR hyperspectral imaging and machine learning for nondestructive detection of nutrient contents in sorghum [J]. *Scientific Reports*,2025,15:6067.