



杜慧平, 赵丽洁, 杜慧玲, 李咏玲. 施肥对谷子氨基酸组分的影响及营养评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11):155-169.

DU Huiping, ZHAO Lijie, DU Huiling, LI Yongling. Effects of fertilization on the amino acid composition of foxtail millet and nutrition evaluation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11):155-169.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.16

施肥对谷子氨基酸组分的影响及营养评价

杜慧平¹ 赵丽洁² 杜慧玲^{3*} 李咏玲³

(1. 山西农业大学 期刊中心, 太原 030031;

2. 山西运城农业职业技术学院, 山西 运城 044000;

3. 山西农业大学 基础部, 山西 太谷 030801)

摘 要 为探究不同有机无机肥配施对小米氨基酸含量及营养品质的影响, 采用随机区组试验设计, 设置常规减氮(120(N₁)和180 kg/hm²(N₂)), 常规施氮(240(N₃)和360 kg/hm²(N₄)), 生物有机肥(A)和发酵黄粉虫粪(B)处理均各2个水平分别为3 750 (A₁-B₁)、7 500 kg/hm²(A₂-B₂)以及减氮配施有机肥(N₁A₁-N₁A₂-N₂A₁-N₂A₂和N₁B₁-N₁B₂-N₂B₁-N₂B₂)处理, 以不施肥为对照(CK), 测定各处理小米中17种氨基酸含量, 运用氨基酸比值系数法及多元统计法分析谷子氨基酸组成及含量的变化特征, 并以联合国粮食及农业组织和世界卫生组织(FAO/WHO)氨基酸标准评价营养价值。结果表明: 减氮配施有机肥各处理均可改善小米的氨基酸组成, 显著提高必需氨基酸(EAA)含量($P < 0.05$), 与FAO/WHO提出的全鸡蛋蛋白标准的贴近度为0.823~0.834。与CK相比, N₂A₂的小米鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量分别增加6.47%和32.7%。与常规施氮(N₄)相比, 减氮配施有机肥处理(N₁A₁-N₁A₂-N₁B₁-N₁B₂-N₂A₁-N₂A₂-N₂B₁-N₂B₂)EAA含量增加范围在13.79%~22.41%, 贴近度增加3.26%~5.01%, EAA/TAA和EAA/NEAA分别接近0.400和0.600。综上, 施用有机肥可以显著提高小米氨基酸含量, 进而提升小米的营养价值, 其中尿素180 kg/hm²+生物有机肥或发酵黄粉虫粪7 500 kg/hm²处理(N₂A₂-N₂B₂)的效果最佳。

关键词 谷子; 施肥; 氨基酸比值系数法; 多元统计法; 营养评价

中图分类号 S515.062

文章编号 1007-4333(2024)11-0155-15

文献标志码 A

Effects of fertilization on the amino acid composition of foxtail millet and nutrition evaluation

DU Huiping¹, ZHAO Lijie², DU Huiling^{3*}, LI Yongling³

(1. Journal Center, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China;

2. Shanxi Yuncheng Agricultural Vocational and Technical College, Yuncheng 044000, China;

3. Basic Department, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract In order to explore the effects of different combinations of organic and inorganic fertilizers on the amino acid content and nutritional value of foxtail millet, a randomized block experiment design was used in this study, and different treatments were set. The treatments were the conventional nitrogen reduction of 120 (N₁), 180 kg/hm² (N₂), conventional nitrogen application of 240 (N₃), 360 kg/hm² (N₄), biological organic fertilizer (A) and fermented mealworm excrements (B) including 2 levels of 3 750 (A₁, B₁) and 7 500 kg/hm² (A₂, B₂), respectively, and the treatments of nitrogen reduction combined with organic

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 山西省重点研发计划(2022ZDYF119); 山西省科技创新人才队伍专项计划(202204051002036); 山西省现代农业产业技术体系建设专项(2024CYJSTX04); 山西农业大学学术恢复专项(2020xshf42); 山西农业大学博士科研启动项目(20162210)

第一作者: 杜慧平(ORCID:0009-0006-0489-3338), 副编审、副研究员, 主要从事期刊出版及土壤肥料研究, E-mail: sxnykxdu@126.com

通讯作者: 杜慧玲(ORCID:0009-0006-6510-2966), 教授, 主要从事作物化学调控与逆境生理、植物营养生物学与调控科学研究, E-mail: duhuiling66@163.com

fertilizer (N_1A_1 , N_1A_2 , N_2A_1 , N_2A_2 and N_1B_1 , N_1B_2 , N_2B_1 , N_2B_2). No fertilization was taken as the control (CK). The content of 17 amino acids in millet of each treatment was measured, and the changing characteristics of composition and content of millet amino acid were analyzed by amino acid ratio coefficient method and multivariate statistical method. The nutritional value was evaluated through the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the World Health Organization (FAO/WHO) amino acid standards. The results showed that the treatments of nitrogen reduction combined with organic fertilizer significantly improved the composition of millet amino acid and significantly increased the content of essential amino acids (EAA), and its closeness to the whole egg protein standard proposed by FAO/WHO was between 0.823 and 0.834. Compared with CK, the content of fresh and sweet amino acids in millet of the N_2A_2 treatment increased by 6.47% and 32.7%, respectively. Compared with conventional nitrogen application N_4 , the increasing range of EAA content in the treatments of nitrogen reduction combined organic fertilizer (N_1A_1 , N_1A_2 , N_1B_1 , N_1B_2 , N_2A_1 , N_2A_2 , N_2B_1 , N_2B_2) was from 13.79% to 22.41%, with a closeness increase of 3.51% to 5.01%. EAA/TAA and EAA/NEAA were close to 0.400 and 0.600, respectively. In summary, the application of organic fertilizer significantly increased the millet amino acid content, thereby enhanced the nutritional value of millet. Among them, the treatment of 180 kg/hm² of urea + 7 500 kg/hm² of biological organic fertilizer or fermented yellow mealworm manure (N_2A_2 , N_2B_2) had the best effect.

Keywords foxtail millet; fertilization; amino acid ratio coefficient method; multivariate statistical method; nutritional evaluation

谷子是起源于我国的一年生禾本科作物,在我国北方有着较大的种植面积,被称为“杂粮之首”^[1-3]。谷子脱壳后为小米,富含蛋白质、维生素、矿物质和氨基酸等营养成分,具有健脾暖胃、抗氧化、改善血清胆固醇、血脂等功能^[4-5],对调整膳食结构起着较为重要的作用^[6]。小米的氨基酸种类齐全,含量丰富,含有的人体必需氨基酸含量比玉米、大米和小麦粉分别高出 42.6%、56.5% 和 80.6%^[1]。氨基酸组分和含量对小米营养品质起着关键作用。近年来,随着人们生活水平的提升,在提高谷子产量的同时,迫切需要提高小米品质^[7]。黄伟等^[1]通过分析不同小米品种主要营养成分及氨基酸组分发现,不同小米品种主要营养成分存在差异。Matsumoto 等^[8]研究表明,小米中亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸等人体必需氨基酸在蛋白质合成方面有明显的增强作用。此外,小米中富含的甲硫氨酸在抗脂肪肝和促进人体胰岛素分泌方面有重要作用^[9],并且可以促进血清素的分泌,还有助睡眠的功效^[10-11]。黄伟等^[1]研究发现,小米必需氨基酸含量中除赖氨酸含量偏低外,其他氨基酸比例均接近或符合 WHO 标准。因此,研究氨基酸含量丰富且均衡的施肥方式是改善人们膳食结构多样性的有利保障,并且对提高小米品质、指导科学合理施肥具有重要意义。

作物产量和品质受作物品种、施肥等因素的影响,合理施肥可以改善土壤环境,提高作物产量和品质^[3]。孙文彦等^[11]通过对玉米有机无机配施的长期定位试验发现,有机、无机肥配施可实现玉米产量和氨基酸品质的协同提高;黄清梅等^[12]研究表明,施用氮肥可显著影响玉米籽粒氨基酸组分和含量;彭熙等^[13]通过有机无机肥配施对百香果氨基酸组分影响的研究表明,配施有机肥处理百香果总氨基酸、必需氨基酸及鲜味氨基酸含量分别显著增加 82.40%、78.35% 及 87.18%。

关于谷子的研究多集中于不同品种小米氨基酸含量及组分的差异,而有机肥和化学氮减量配施对小米氨基酸组分及营养评价的相关研究鲜有报道。本研究以‘晋谷 21’为试验材料,测定常规施氮、减氮、生物有机肥和发酵黄粉虫粪以及减氮配施有机肥等处理的小米氨基酸含量,运用氨基酸比值系数法及多元统计法比较不同处理小米氨基酸组分含量的变化特征,旨在探究不同有机无机肥配施对小米氨基酸含量及营养价值的影响,以期为提高谷子品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山西农业大学申奉试验基地山西

省晋中市太谷区申奉村(112°28'E, 37°12'N), 海拔 847 m。该地属于温带大陆性气候, 年平均气温 10.4 °C, 年平均总降雨量 397.1 mm, 年无霜期 179 d。土壤为石灰性褐土, 土壤 pH 7.80、有机质含量 20.85 g/kg、全氮含量 0.974 g/kg、碱解氮含量 50.74 mg/kg、有效磷含量 38.72 mg/kg、速效钾含量 122.65 mg/kg。

1.2 试验材料

供试谷子‘晋谷 21 号’为粮用常规品种, 购于山西汾都香种业科技有限公司。其幼苗绿色, 单秆, 主茎高 146~157 cm, 主茎节数 23 节, 茎粗 0.66 cm, 单株草重 46 g, 谷草比 1.0:2.3, 穗长 22~25 cm, 穗重 22.0~24.5 g, 出谷率 75%~90%, 出米率 70%~80%, 千粒重 3.0~3.3 g。抗旱性强。粗蛋白含量 15.12%, 粗脂肪含量 5.76%, 总淀粉含量 73.84%, 赖氨酸含量 0.28%。

生物有机肥购于京台四方(北京)生物科技有限公司, 有机质含量 ≥ 60 g/100 g, 有效活菌数 (CFU) ≥ 3 亿个/g, N+P₂O₅+K₂O 含量 ≥ 6 g/100 g; 自制发酵黄粉虫粪(干燥黄粉虫粪与水质比 1:1, 添加过磷酸钙质量为黄粉虫粪质量的 3%, 搅拌均匀, 然后装在不透气塑料袋, 扎紧袋口, 厌氧发酵至褐色, 发酵过程中打开口翻动一次)有机质含量 67 g/100 g, 氮 2.87 g/100 g, 磷 1.98 g/100 g, 钾 1.26 g/100 g; 尿素(N 46 g/100 g)由山西天泽煤化工集团股份公司生产。

1.3 试验设计

试验采用完全随机区组试验设计, 每个处理小区面积 3 m×5 m=15 m², 3 次重复, 周围各设 1 m 保护行。设置不施肥、有机肥和尿素单施、有机肥和无机肥配施共 17 个处理(表 1), 设置常规减氮(120(N₁) 和 180 kg/hm²(N₂)), 常规施氮(240(N₃) 和 360 kg/hm²(N₄)), 生物有机肥(A)和发酵黄粉虫粪(B)处理均各 2 个水平分别为 3 750 (A₁、B₁)、7 500 kg/hm²(A₂、B₂)以及减氮配施有机肥(N₁A₁、N₁A₂、N₁B₁、N₁B₂、N₂A₁、N₂A₂、N₂B₁、N₂B₂)处理, 以不施肥为对照(CK)。播种前, 将所有肥料均作为基肥一次全部施入, 旋地、播种。采用覆膜条播, 1 膜 2 行, 行距 50 cm, 株距 6 cm, 出苗后 4~6 叶期间苗, 留苗密度 45 万株/hm², 谷子全生育期间不浇水, 不追肥, 中耕除草 2 次。5 月 3 日播种, 10 月 3 日收获。

1.4 测定指标及方法

成熟期每个小区随机选取 1 个 2 m² (1 m×2 m) 样方, 每个样方 2 行, 将其谷穗剪下自然风干至恒重, 脱粒称重(含水率 < 13%), 使用砻谷机碾 2 次去掉谷壳, 去除杂质后保存至 -20 °C 冰箱备用。

采用福斯华(北京)科贸有限公司的 NIRSTMDS2500 近红外分析仪测定小米氨基酸组分; 根据 FAO/WHO 1973 年提出的 EAA 蛋白质评价标准^[14]和中国医学科学院营养与食品卫生研究所提出的鸡蛋蛋白氨基酸模式标准^[15], 按照氨基酸比值系数法^[16], 分别计算氨基酸比值系数(Ratio Coefficient, RC)、氨基酸比值(Ratio of amino acid, RAA)、谷子蛋白质的比值系数分(score of ratio coefficient, SRC)、必需氨基酸指数(essential amino acids index, EAAI)。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行处理, 用 Origin 2021 作图, 用 SPSS 20.0 进行显著性(Duncan)分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下小米氨基酸组分及含量的变化

由表 2 可知, 小米中 7 种必需氨基酸含量较高的为异亮氨酸(Ile)和苯丙氨酸(Phe), Ile 含量的变化范围为 1.45~1.55 g/100 g, Phe 含量在 0.55~1.00 g/100 g。单施生物有机肥处理(A₁、A₂)的 Ile 和 Phe 的平均含量为 1.525 和 0.935 g/100 g, 单施黄粉虫粪处理(B₁、B₂)为 1.515 和 0.910 g/100 g; 减氮配施生物有机肥处理 N₂A₂ 的 Ile 含量最高为 1.55 g/100 g, N₁B₂ 的 Phe 含量最高为 1.00 g/100 g, 在同一施氮水平下, 谷子 Ile 和 Phe 含量均随着生物有机肥(A)施用量的增加而增加, 高氮处理的 Ile 和 Phe 含量均高于低氮处理, 配施黄粉虫粪(N₂B₁、N₂B₂)的变化规律则相反。单施氮肥处理(N₁、N₂、N₃、N₄)中, 小米 Lys、Met 和 Thr 含量随着氮肥用量的增加呈逐渐降低, N₄ 的这 3 种氨基酸含量分别比不施肥的对照(CK)低 28.00%、52.63%、14.28% (P<0.05); 减氮配施生物有机肥处理(N₁A₁、N₁A₂、N₂A₁、N₂A₂)及减氮配施发酵黄粉虫粪处理(N₁B₁、N₁B₂、N₂B₁、N₂B₂)的这 3 种氨基酸含量均高于 N₄, 但差异不显著。

表1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	编号 Number	尿素/(kg/hm ²) Urea	有机肥/(kg/hm ²) Organic fertilizer	
			生物有机肥(A) Bioorganic fertilizer	发酵黄粉虫粪(B) Fermented yellow mealworm feces
不施肥 No fertilization	CK			
单施尿素 Single application of urea	N ₁	120		
	N ₂	180		
	N ₃	240		
	N ₄	360		
单施有机肥 Single application of organic fertilizer	A ₁		3 750	
	A ₂		7 500	
	B ₁			3 750
	B ₂			7 500
有机无机肥配施 Organic and inorganic compound application	N ₁ A ₁	120	3 750	
	N ₁ A ₂		7 500	
	N ₁ B ₁	240		3 750
	N ₁ B ₂			7 500
	N ₂ A ₁		3 750	
	N ₂ A ₂		7 500	
	N ₂ B ₁			3 750
	N ₂ B ₂			7 500

由表3可知,小米10种非必需氨基酸(NEAA)中含量较高的为谷氨酸(Glu)、天冬氨酸(Asp)、丙氨酸(Ala),在单施氮肥处理(N₁、N₂、N₃、N₄)中,脯氨酸(Pro)、酪氨酸(Tyr)、精氨酸(Arg)和胱氨酸(Cys)含量均随氮肥施用量增加而增加,天冬氨酸(Asp)、甘氨酸(Gly)、丝氨酸(Ser)和亮氨酸(Leu)含量则表现为降低,单施有机肥处理(A₁、A₂、B₁、B₂)中,在相同施肥量下,B₁、B₂的小米Glu、Ala、Tyr、Arg和Leu含量均高于A₁、A₂。N₁A₁、N₁A₂、N₂A₁、N₂A₂及N₁B₁、N₁B₂、N₂B₁、N₂B₂的Pro、Tyr、Arg和Gys含量比N₄分别降低18.18%~58.18%、24.05%~29.11%、3.23%~14.52%和5.56%~33.33%;Ala、Ser和Leu含量分别比N₄增加14.89%~18.09%、10.20%~18.37%和10.00%~25.00%。

2.2 不同处理下小米必需氨基酸营养评价

由表4可知,小米中的总氨基酸(TAA)含量在11.35%~11.94%,必需氨基酸(EAA)含量为4.06%~4.84%。EAA与TAA含量比值范围在0.34~0.42,EAA与非必需氨基酸(NEAA)比值范围在0.52~0.67,这分别与FAO/WHO提出的EAA/TAA(0.400)和EAA/NEAA(0.600)的标准相接近。单施氮肥处理,EAA和TAA含量由高到低为N₁>N₂>N₃>N₄;氮肥减量配施生物有机肥处理的EAA随着生物有机肥施用量的增加而升高,即N₁A₂>N₁A₁和N₂A₂>N₂A₁;氮肥减量配施发酵黄粉虫粪处理则相反,即N₁B₁>N₁B₂和N₂B₁>N₂B₂。减氮配施生物有机肥处理(N₁A₁、N₁A₂、N₂A₁、N₂A₂)的EAA含量比N₄增加13.79%~

表 2 不同施肥处理小米必需氨基酸含量

Table 2 Content of essential amino acids in foxtail millet under different fertilization treatments g/100 g

处理 Treatment	组氨酸 His	异亮氨酸 Ile	赖氨酸 Lys	蛋氨酸 Met	苯丙氨酸 Phe	苏氨酸 Thr	缬氨酸 Val
CK	0.28±0.01 ^{abc}	1.47±0.01 ^{ghi}	0.25±0.01 ^{abcd}	0.38±0.02 ^e	0.88±0.02 ^{gh}	0.42±0.01 ^{ab}	0.48±0.01 ^{gh}
N ₁	0.29±0.01 ^a	1.48±0.00 ^{efgh}	0.27±0.01 ^a	0.39±0.01 ^e	0.87±0.01 ^{gh}	0.43±0.00 ^a	0.51±0.00 ^{bcd}
N ₂	0.28±0.01 ^{ab}	1.45±0.01 ⁱ	0.25±0.01 ^{cde}	0.39±0.03 ^e	0.86±0.01 ^h	0.41±0.01 ^{bcd}	0.49±0.01 ^{efg}
N ₃	0.25±0.00 ^{bcd}	1.45±0.01 ^{hi}	0.26±0.01 ^{ab}	0.26±0.01 ^f	0.70±0.01 ⁱ	0.37±0.02 ^e	0.47±0.02 ^h
N ₄	0.26±0.00 ^{bcd}	1.55±0.00 ^a	0.18±0.00 ^g	0.18±0.00 ^g	0.55±0.01 ^j	0.36±0.02 ^e	0.45±0.01 ⁱ
A ₁	0.25±0.02 ^{cde}	1.51±0.02 ^{cde}	0.24±0.01 ^{cde}	0.45±0.03 ^{abc}	0.92±0.03 ^{cde}	0.40±0.01 ^d	0.52±0.01 ^{bc}
A ₂	0.22±0.02 ^{ef}	1.54±0.02 ^{ab}	0.25±0.00 ^{bcd}	0.46±0.02 ^{ab}	0.95±0.03 ^b	0.42±0.01 ^{abc}	0.52±0.01 ^b
B ₁	0.23±0.03 ^{def}	1.52±0.02 ^{bc}	0.23±0.01 ^f	0.47±0.02 ^{ab}	0.91±0.03 ^{def}	0.39±0.01 ^d	0.52±0.01 ^b
B ₂	0.24±0.02 ^{de}	1.51±0.02 ^{cd}	0.25±0.01 ^{cde}	0.44±0.02 ^{bcd}	0.91±0.02 ^{cde}	0.41±0.01 ^{bcd}	0.51±0.01 ^{bc}
N ₁ A ₁	0.25±0.03 ^{bcd}	1.46±0.02 ^{ghi}	0.25±0.02 ^{bcd}	0.39±0.05 ^e	0.92±0.02 ^{cde}	0.42±0.02 ^{abc}	0.48±0.01 ^{gh}
N ₁ A ₂	0.23±0.02 ^{def}	1.51±0.03 ^{cde}	0.26±0.01 ^{abc}	0.42±0.03 ^{cde}	0.95±0.03 ^b	0.42±0.01 ^{ab}	0.51±0.01 ^{cd}
N ₂ A ₁	0.25±0.01 ^{bcd}	1.50±0.01 ^{cdef}	0.23±0.01 ^{ef}	0.44±0.01 ^{bcd}	0.87±0.01 ^{gh}	0.39±0.01 ^d	0.50±0.01 ^{cde}
N ₂ A ₂	0.25±0.02 ^{cde}	1.55±0.02 ^a	0.26±0.01 ^{abc}	0.48±0.03 ^a	0.93±0.01 ^{bcd}	0.42±0.01 ^{abc}	0.55±0.01 ^a
N ₁ B ₁	0.21±0.01 ^f	1.49±0.01 ^{efg}	0.25±0.01 ^{abcd}	0.40±0.02 ^e	1.00±0.01 ^a	0.43±0.01 ^a	0.50±0.01 ^{def}
N ₁ B ₂	0.28±0.01 ^{ab}	1.48±0.00 ^{efgh}	0.26±0.01 ^{abc}	0.39±0.01 ^e	0.87±0.01 ^{gh}	0.42±0.00 ^{abc}	0.50±0.01 ^{def}
N ₂ B ₁	0.24±0.02 ^{de}	1.52±0.01 ^{bc}	0.26±0.01 ^{abc}	0.41±0.01 ^{de}	0.94±0.01 ^{bc}	0.43±0.01 ^a	0.50±0.01 ^{cde}
N ₂ B ₂	0.24±0.02 ^{de}	1.50±0.01 ^{cdef}	0.24±0.00 ^{def}	0.44±0.02 ^{bcd}	0.89±0.02 ^{efg}	0.40±0.01 ^{cd}	0.51±0.01 ^{cd}

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Data are mean ± SD; different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments at the 0.05 level. The same below.

22.41%，配施发酵黄粉虫粪处理（N₁B₁、N₁B₂、N₂B₁、N₂B₂）的 EAA 含量增加 15.52%~17.73%。N₁A₁、N₁B₁、N₁B₂、N₂B₂、N₂B₁ 的 EAA/TAA、EAA/NEAA 比值更接近 0.400 和 0.600 的标准，因此，这 5 个处理小米的蛋白质为优质蛋白，且营养价值较高。

由表 5 可知，不同施肥处理小米必需氨基酸占总氨基酸含量的 40.38%~46.24%，接近鸡蛋蛋白 49.70% 的标准，但高于 FAO/WHO 模式蛋白 35.00% 的标准。与 CK 相比，单施氮肥处理（N₁、N₂、N₃、N₄）使小米中的必需氨基酸占总氨基酸的比例下降，且随着施氮量的增加而降低；单施有机肥处理（A₁、A₂、B₁、B₂）可增加必需氨基酸的含量，必需氨基酸总量占氨基酸总含量比值由高到低为 A₁>A₂>B₁>B₂，且 Ile 和 Phe + Tyr 比例极高，分别

占总氨基酸含量的 12.20%~13.29% 和 11.40%~13.44%，其中 Ile 含量是鸡蛋蛋白标准的 2 倍多，Phe + Tyr 含量是 FAO/WHO 蛋白标准的 2 倍多，是鸡蛋蛋白标准的 1 倍以上。减氮与生物有机肥配施处理（N₁A₁、N₁A₂、N₂A₁、N₂A₂）Ile 和（Phe + Tyr）比例分别比 N₄ 高出 2.95%~7.87% 和 11.84~14.39%；减氮与发酵黄粉虫粪配施处理（N₁B₁、N₁B₂、N₂B₁、N₂B₂）的 Ile 和 Phe + Tyr 比例分别比 N₄ 高出 3.19%~7.89% 和 11.84%~14.39%。各处理小米中的亮氨酸（Leu）、缬氨酸（Val）、赖氨酸（Lys）、苏氨酸（Thr）分别占总氨基酸含量的 3.71%~4.43%、3.84%~4.56%、1.52%~2.23% 和 3.02%~3.70%，与 FAO/WHO 蛋白标准相近，低于鸡蛋蛋白标准含量。

由图 1 可知，所有处理中风味氨基酸含量从高

表 3 不同施肥处理小米非必需氨基酸含量

Table 3 Content of non-essential amino acids in foxtail millet under different fertilization treatments										g/100 g
处理 Treatment	谷氨酸 Glu	天冬氨酸 Asp	丙氨酸 Ala	脯氨酸 Pro	酪氨酸 Tyr	精氨酸 Arg	半胱氨酸 Cys	甘氨酸 Gly	丝氨酸 Ser	亮氨酸 Leu
CK	2.30±0.02 ^{def}	0.83±0.01 ^{cd}	1.08±0.01 ^g	0.37±0.01 ^{efg}	0.56±0.01 ^d	0.52±0.01 ^h	0.12±0.01 ^e	0.46±0.01 ^{abc}	0.57±0.01 ^{abc}	0.47±0.01 ^{def}
N ₁	2.51±0.04 ^{abc}	0.87±0.00 ^a	1.11±0.00 ^{ab}	0.39±0.01 ^{de}	0.57±0.00 ^d	0.56±0.01 ^{cdef}	0.13±0.01 ^e	0.48±0.00 ^a	0.58±0.00 ^a	0.52±0.01 ^{ab}
N ₂	2.57±0.04 ^a	0.86±0.00 ^{ab}	1.10±0.01 ^{abed}	0.39±0.02 ^{cd}	0.60±0.02 ^c	0.57±0.02 ^{cdef}	0.14±0.02 ^{cd}	0.45±0.01 ^{bed}	0.54±0.01 ^{cde}	0.51±0.00 ^b
N ₃	2.32±0.09 ^{def}	0.86±0.00 ^{abc}	0.95±0.01 ^h	0.54±0.01 ^a	0.80±0.00 ^a	0.62±0.03 ^a	0.18±0.01 ^a	0.46±0.01 ^{bed}	0.49±0.02 ^f	0.42±0.00 ^{hi}
N ₄	2.50±0.07 ^{abc}	0.82±0.01 ^{de}	0.94±0.00 ^h	0.55±0.02 ^a	0.79±0.01 ^a	0.62±0.03 ^a	0.18±0.00 ^{ab}	0.45±0.01 ^{bed}	0.49±0.02 ^f	0.40±0.01 ⁱ
A ₁	2.07±0.26 ^g	0.80±0.02 ^{efg}	1.09±0.02 ^{efg}	0.35±0.01 ^{gh}	0.60±0.01 ^c	0.57±0.01 ^{cdef}	0.14±0.01 ^{cd}	0.44±0.01 ^{de}	0.54±0.01 ^{cde}	0.46±0.02 ^{ef}
A ₂	2.26±0.09 ^{ef}	0.82±0.01 ^{def}	1.08±0.01 ^{fg}	0.38±0.03 ^{cdef}	0.59±0.01 ^c	0.57±0.01 ^{cdef}	0.15±0.01 ^c	0.46±0.01 ^{abc}	0.56±0.01 ^{abcd}	0.47±0.02 ^{def}
B ₁	2.36±0.08 ^{def}	0.79±0.02 ^g	1.09±0.01 ^{defg}	0.42±0.01 ^c	0.64±0.01 ^b	0.59±0.01 ^{bc}	0.17±0.01 ^b	0.44±0.01 ^{de}	0.53±0.01 ^e	0.50±0.02 ^{bc}
B ₂	2.42±0.06 ^{bcd}	0.82±0.02 ^{def}	1.10±0.01 ^{abde}	0.33±0.01 ^h	0.60±0.01 ^c	0.58±0.01 ^{bed}	0.15±0.01 ^c	0.45±0.01 ^{bed}	0.55±0.01 ^{bed}	0.48±0.01 ^{cde}
N ₁ A ₁	2.54±0.14 ^{ab}	0.82±0.04 ^{de}	1.10±0.01 ^{abde}	0.29±0.01 ⁱ	0.57±0.03 ^d	0.55±0.02 ^{efg}	0.12±0.02 ^e	0.46±0.03 ^{abc}	0.56±0.03 ^{abcd}	0.45±0.02 ^{ef}
N ₁ A ₂	2.40±0.20 ^{def}	0.82±0.01 ^{de}	1.09±0.01 ^{cdef}	0.28±0.01 ⁱ	0.57±0.01 ^d	0.56±0.00 ^{def}	0.13±0.01 ^{de}	0.46±0.01 ^{abc}	0.57±0.01 ^{ab}	0.46±0.02 ^f
N ₂ A ₁	2.22±0.03 ^g	0.79±0.01 ^{fg}	1.08±0.00 ^g	0.39±0.01 ^{cd}	0.60±0.01 ^c	0.55±0.01 ^{fg}	0.14±0.01 ^{cd}	0.43±0.00 ^e	0.53±0.00 ^e	0.47±0.01 ^{def}
N ₂ A ₂	2.49±0.06 ^{abcd}	0.83±0.02 ^{cd}	1.11±0.01 ^a	0.45±0.01 ^b	0.63±0.02 ^b	0.60±0.01 ^{ab}	0.17±0.01 ^b	0.46±0.01 ^{abc}	0.56±0.01 ^{abcd}	0.53±0.01 ^a
N ₁ B ₁	2.59±0.06 ^a	0.82±0.01 ^{de}	1.11±0.01 ^{abc}	0.23±0.0 ^j	0.56±0.01 ^d	0.57±0.00 ^{cdef}	0.12±0.01 ^e	0.47±0.01 ^{ab}	0.58±0.01 ^a	0.44±0.01 ^{gh}
N ₁ B ₂	2.42±0.02 ^{bcd}	0.84±0.01 ^{bed}	1.10±0.01 ^{bcd}	0.37±0.02 ^{efg}	0.57±0.00 ^d	0.55±0.01 ^{fg}	0.13±0.00 ^{de}	0.47±0.01 ^{abc}	0.57±0.01 ^{abc}	0.50±0.01 ^{bc}
N ₂ B ₁	2.49±0.03 ^{abcd}	0.83±0.01 ^{cd}	1.11±0.01 ^{abc}	0.36±0.02 ^{gh}	0.56±0.01 ^d	0.53±0.01 ^{gh}	0.13±0.01 ^e	0.47±0.01 ^{ab}	0.58±0.00 ^a	0.48±0.01 ^{cde}
N ₂ B ₂	2.57±0.03 ^a	0.80±0.01 ^{efg}	1.10±0.00 ^{abde}	0.38±0.01 ^{de}	0.60±0.01 ^c	0.58±0.02 ^{bcd}	0.15±0.01 ^c	0.45±0.00 ^{cd}	0.54±0.00 ^{bc}	0.49±0.01 ^{cd}

表 4 不同施肥处理小米氨基酸总量、必需氨基酸以及必需氨基酸与总氨基酸、非必需氨基酸的比值

Table 4 Foxtail millet TAA, EAA, EAA/TAA and EAA/NEAA values under different fertilization treatments

处理 Treatment	TAA	EAA	EAA/TAA	EAA/NEAA
CK	11.45	4.64	0.41	0.64
N ₁	11.94	4.75	0.40	0.62
N ₂	11.83	4.63	0.39	0.60
N ₃	11.91	4.28	0.36	0.56
N ₄	11.82	4.06	0.34	0.52
A ₁	11.35	4.74	0.42	0.67
A ₂	11.71	4.84	0.41	0.66
B ₁	11.78	4.77	0.41	0.64
B ₂	11.76	4.75	0.40	0.63
N ₁ A ₁	11.63	4.62	0.40	0.62
N ₁ A ₂	11.64	4.75	0.41	0.65
N ₂ A ₁	11.40	4.66	0.41	0.65
N ₂ A ₂	12.28	4.97	0.40	0.63
N ₁ B ₁	11.76	4.71	0.40	0.63
N ₁ B ₂	11.70	4.69	0.40	0.63
N ₂ B ₁	11.84	4.78	0.40	0.63
N ₂ B ₂	11.88	4.71	0.40	0.61

注：TAA, 总氨基酸；EAA, 必需氨基酸；NEAA, 非必需氨基酸。

Note: TAA, total amino acids; EAAs, essential amino acids; NEAA, non-essential amino acids.

到低为：苦味氨基酸>鲜味氨基酸>甜味氨基酸，且差异显著($P<0.05$)。施肥处理可显著提高小米鲜味氨基酸含量和氨基酸差值，含量最高的处理为N₂A₂，分别为3.54和1.16。甜味和鲜味氨基酸含量随着氮肥用量的增加呈先升后降的趋势，最高值均出现在N₂，分别为2.85%和3.44%；单施有机肥(A₁、A₂)处理，苦味氨基酸含量随着有机肥施用量的增加而增加，发酵黄粉虫粪施肥处理(B₁、B₂)苦味氨基酸含量均显著低于生物有机肥处理，N₂A₂、N₁B₁小米苦味氨基酸含量均显著降低($P<0.05$)；所有的减氮配施有机肥处理(N₁A₁、N₁A₂、N₂A₁、N₂A₂)小米甜味氨基酸含量均显著高于CK，在相同施氮量下配施黄粉虫粪处理均高于生物有机肥处理，分别升高1.77%~6.47%和4.31%~8.27%。

2.3 不同处理下小米蛋白营养价值评价

由图2可知，17个施肥处理小米蛋白的贴近度范围在0.798~0.838，其中处理N₂A₂最高，处理N₄最低。单施氮肥处理小米蛋白贴近度随着施用量的增加而减小，单施有机肥处理(A₁、A₂)小米蛋白贴近度在0.832~0.834，处理间差异不显著，与N₄相比蛋白贴近度增加4.26%~4.51%。与N₄相比，减氮配施有机肥处理(N₁A₁、N₁A₂、N₂A₁、N₂A₂)提高了小米蛋白的贴近度，有机肥有助于改善小米氨基酸的比例，与鸡蛋蛋白的贴近度升高，改善了小米蛋白营养价值。

由表6可知，17个施肥处理，有3种氨基酸的RAA及RC均在1左右，有2种氨基酸指标>1，有2种氨基酸指标<1，单施有机肥处理(A₁、A₂、B₁、

表5 不同施肥处理小米必需氨基酸占总氨基酸的比例

Table 5 The ratio of essential amino acids to total amino acids in millet under different fertilization treatments %

处理 Treatment	Leu	Phe+Tyr	Val	Ile	Lys	Thr	Met+Cys	总量 Total
CK	4.13	12.54	4.22	12.86	2.21	3.70	4.34	44.00
N ₁	4.33	12.04	4.27	12.4	2.23	3.60	4.30	43.17
N ₂	4.31	12.37	4.14	12.23	2.09	3.44	4.48	43.05
N ₃	4.25	12.57	3.97	12.2	2.21	3.08	3.75	42.04
N ₄	4.43	11.4	3.84	13.12	1.52	3.02	3.05	40.38
A ₁	4.08	13.44	4.56	13.29	2.14	3.5	5.24	46.24
A ₂	4.04	13.21	4.47	13.18	2.13	3.56	5.21	45.79
B ₁	4.22	13.1	4.44	12.91	1.95	3.34	5.43	45.39
B ₂	4.08	12.87	4.37	12.84	2.10	3.46	4.99	44.7
N ₁ A ₁	3.90	12.76	4.13	12.56	2.15	3.61	4.39	43.51
N ₁ A ₂	3.92	13.04	4.36	12.95	2.21	3.64	4.70	44.81
N ₂ A ₁	4.15	12.92	4.42	13.16	2.05	3.45	5.09	45.23
N ₂ A ₂	4.34	12.75	4.48	12.65	2.09	3.39	5.26	44.97
N ₁ B ₁	3.71	13.26	4.22	12.64	2.15	3.63	4.42	44.04
N ₁ B ₂	4.27	12.31	4.25	12.65	2.19	3.59	4.45	43.72
N ₂ B ₁	4.05	12.69	4.25	12.81	2.17	3.66	4.53	44.16
N ₂ B ₂	4.10	12.59	4.26	12.59	2.02	3.39	4.94	43.90
鸡蛋蛋白标准 Egg protein standard	8.8	10.0	7.3	6.6	6.4	5.1	5.5	49.7
FAO/WHO 蛋白标准 FAO/WHO protein standard	7.0	6.0	5.0	4.0	5.5	4.0	3.5	35.0

B₂)以及N₁A₂、N₂B₁的EAAI相比于其他处理的较大(>0.80),其中N₁A₂和N₂B₁的SRC较大。表明N₁A₂、N₂B₁的蛋白质更接近人体所需的氨基酸组成比例。

由图3可知,以鸡蛋蛋白标准评价各施肥处理,小米的氨基酸SRC和EAAI较大的处理为N₁B₁、N₂A₂和N₂B₂;因此,这3个处理的小米营养价值与利用率较高,为良好蛋白源。

FAO/WHO模式下各施肥处理小米的氨基酸的SRC由高到低为:N₄>N₃>N₁B₁>N₂A₂>CK>N₁A₂>A₁>N₂B₁>A₂>B₂>N₂B₂>B₁>N₁B₂>N₂>N₂A₂;按照EAAI,各处理小米蛋白含量由高到低为

N₂A₂>A₂>B₁>N₁>B₂>N₂B₁>A₁>N₁A₂>N₂B₂>N₁B₂>N₂>N₂A₁>N₁B₁>CK>N₁A₁>N₃>N₄(图3和表7)。SRC、EAAI均较大的处理为N₁A₂,与鸡蛋蛋白标准一致。2种评价模式下SRC分别为51.84和52.24,因此,N₁A₂的小米必需氨基酸的相对营养价值更高;EAAI分别为0.82和0.73比较接近1.00,说明N₁A₂的小米必需氨基酸比例符合人体所能吸收利用的标准,是较优质的氨基酸组成。

3 讨论

氮、磷是氨基酸合成的重要元素,罗凡等^[17]、黄清梅等^[12]研究表明,氮、磷肥配施能显著提高玉米、

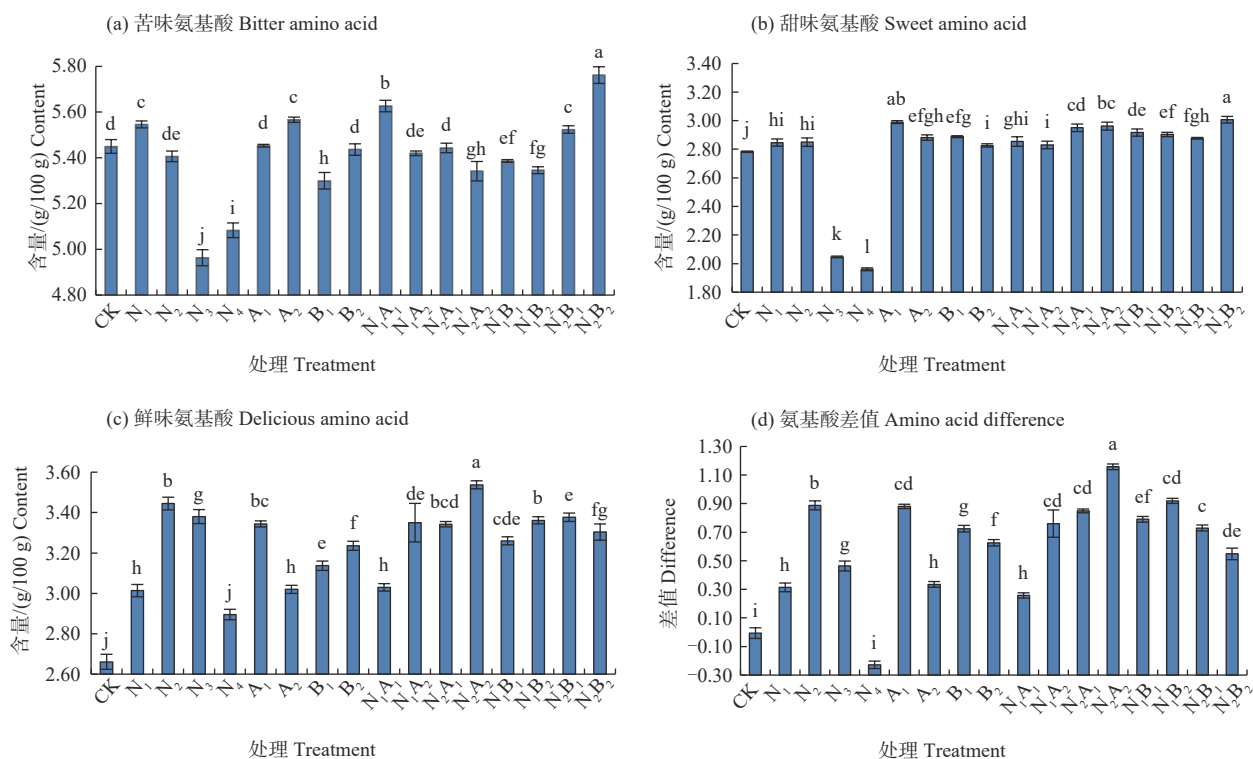


图 1 不同施肥处理小米的风味氨基酸

Fig. 1 Analysis of foxtail millet flavor amino acids under different fertilization treatments

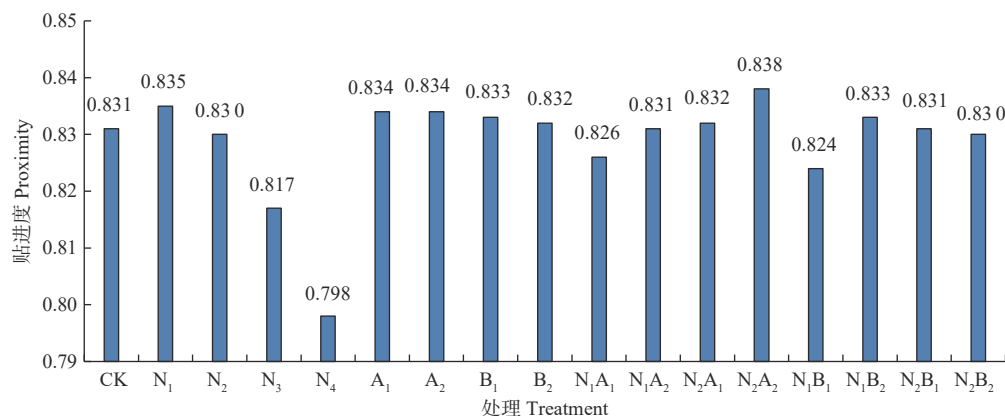


Fig. 2 Proximity between foxtail millet protein and standard egg protein under different fertilization treatments

春茶中总氨基酸含量以及苏氨酸、丝氨酸、天冬氨酸(鲜味、甜味氨基酸)等主要氨基酸含量。赵艳岭^[18]研究表明,不同施肥方法,特别是氮肥用量和施肥时期都能显著影响稻米氨基酸含量,增加施氮量、施肥时期适当后移均可有效提高籽粒蛋白质和氨基酸含量。有机肥的添加增加了土壤中氮肥的含量,同时也保证了作物生育后期的养分需求^[19-20]。本研究中,不同施肥处理的小米中检测出 17 种氨基酸,其中包含人体所需的 7 种必需氨基酸,10 种非必

需氨基酸。与 CK 相比,有机无机肥配施处理均提高了氨基酸的含量。其原因可能在于:1)有机无机肥配施有利于植株进行正常的生理代谢,能不同程度地提升小米品质;2)有机无机肥配施可有效提升作物叶绿素相对含量,增强作物各生育期的光合功能,进而改善小米品质;3)有机无机肥配施可有效改善土壤质量,增加土壤养分有效性,维持养分平衡,改善作物生长的土壤环境,促进其产品器官营养物质的积累,促进作物对 N、P、K 的吸收,进而改

表 6 不同施肥处理小米必需氨基酸 RAA、RC 的比较(鸡蛋蛋白标准)
Table 6 Comparison of essential amino acids RAA and RC of foxtail millet under different fertilization treatments
(whole egg protein standard)

处理 Treatment	蛋白质 特征值 Protein characteristic values	氨基酸 Amino acid						
		Ile	Leu	Leu	Thr	Val	Met+Cys	Phe+Tyr
CK	RAA	0.55	2.73	0.36	0.90	0.73	0.87	1.51
	RC	0.50	2.49	0.33	1.23	0.67	0.80	1.38
N ₁	RAA	0.60	2.74	0.38	0.91	0.77	0.90	1.51
	RC	0.54	2.45	0.34	1.18	0.69	0.81	1.35
N ₂	RAA	0.59	2.68	0.35	0.87	0.74	0.93	1.54
	RC	0.54	2.43	0.32	1.17	0.67	0.85	1.40
N ₃	RAA	0.59	2.69	0.38	0.78	0.72	0.78	1.58
	RC	0.55	2.51	0.35	1.09	0.67	0.73	1.47
N ₄	RAA	0.61	2.87	0.26	0.76	0.69	0.63	1.42
	RC	0.59	2.78	0.25	1.10	0.66	0.61	1.37
A ₁	RAA	0.54	2.79	0.35	0.84	0.78	1.04	1.6
	RC	0.47	2.46	0.31	1.08	0.69	0.92	1.41
A ₂	RAA	0.55	2.86	0.36	0.89	0.79	1.07	1.63
	RC	0.47	2.46	0.31	1.12	0.68	0.92	1.40
B ₁	RAA	0.58	2.81	0.33	0.84	0.79	1.12	1.62
	RC	0.50	2.43	0.28	1.06	0.69	0.97	1.40
B ₂	RAA	0.56	2.80	0.35	0.87	0.78	1.03	1.59
	RC	0.49	2.46	0.31	1.11	0.68	0.90	1.40
N ₁ A ₁	RAA	0.53	2.70	0.36	0.89	0.73	0.89	1.56
	RC	0.48	2.47	0.33	1.23	0.66	0.82	1.43
N ₁ A ₂	RAA	0.53	2.79	0.37	0.90	0.77	0.96	1.6
	RC	0.47	2.47	0.32	1.17	0.68	0.85	1.41
N ₂ A ₁	RAA	0.55	2.78	0.33	0.84	0.76	1.02	1.55
	RC	0.49	2.48	0.3	1.10	0.68	0.91	1.39
N ₂ A ₂	RAA	0.62	2.88	0.37	0.89	0.83	1.13	1.65
	RC	0.52	2.41	0.31	1.06	0.70	0.95	1.38
N ₁ B ₁	RAA	0.51	2.75	0.36	0.91	0.75	0.91	1.64
	RC	0.45	2.46	0.32	1.21	0.67	0.81	1.47
N ₁ B ₂	RAA	0.58	2.74	0.37	0.89	0.75	0.91	1.52
	RC	0.52	2.47	0.33	1.19	0.68	0.82	1.37
N ₂ B ₁	RAA	0.56	2.81	0.37	0.92	0.76	0.94	1.58
	RC	0.49	2.48	0.32	1.21	0.67	0.83	1.39
N ₂ B ₂	RAA	0.57	2.77	0.34	0.86	0.77	1.03	1.58
	RC	0.50	2.45	0.30	1.12	0.68	0.91	1.39

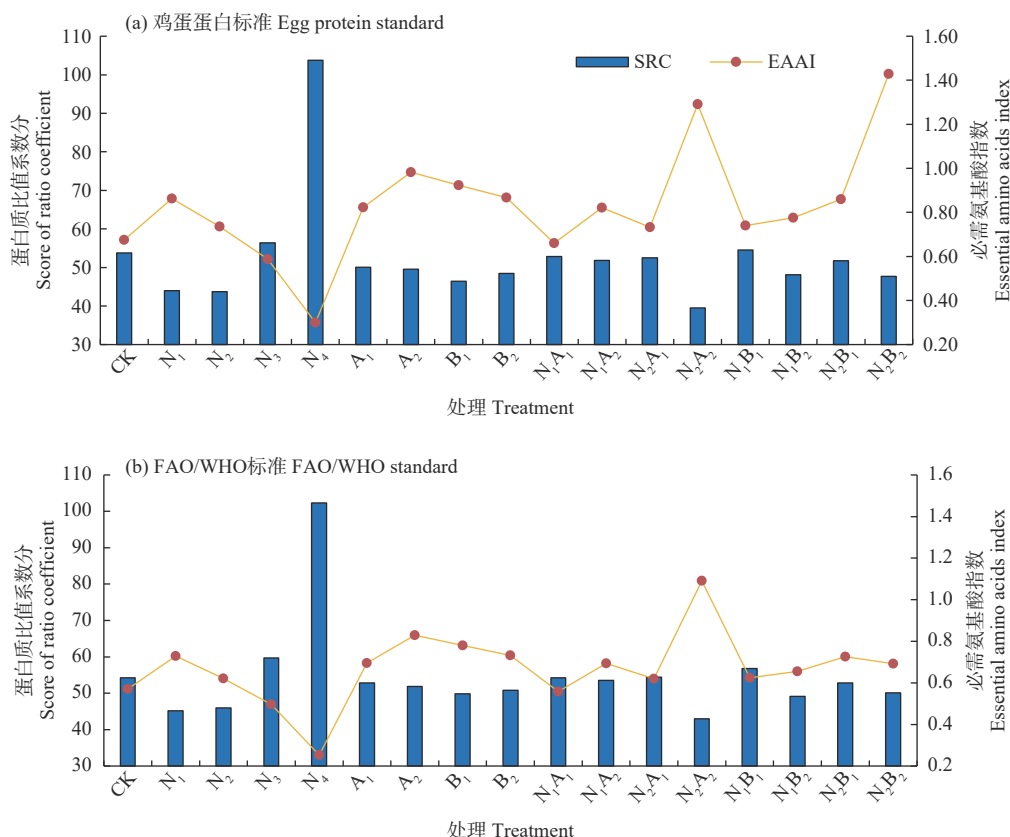


图 3 不同施肥处理的小米必需氨基酸 SRC 和 EAAI

Fig. 3 Essential amino acids SRC and EAAI of millet under different fertilization treatments

善小米品质^[21]。同时本研究还发现,在同一有机肥施肥水平下,与生物有机肥处理相比,单施发酵黄粉虫粪处理总氨基酸含量增加 0.43%~3.79%;发酵黄粉虫粪处理氨基酸总含量相较于生物有机肥配施处理高出 0.52%~3.86%,其中 N₂B₁ 和 N₂B₂ 的氨基酸含量最高分别为 11.84%、11.86%。本研究中,发酵黄粉虫粪处理的氨基酸总量较高的原因,主要是因为黄粉虫粪作为一种优质的有机肥原料,含有丰富的营养物质,与生物有机肥相比,钾含量较高,与尿素配施具有改性和促进肥效的功能。钾肥可明显提高籽粒氨基酸总含量^[22],只有在钾充足时,才能促进作物生长,提高作物产量,加速氨基酸和蛋白质的合成^[23]。这是由于钾参与了 ATP 的代谢和通过韧皮部的运输而供应了碳链。本研究发现,与常规施肥处理相比,发酵黄粉虫粪与尿素配施处理小米所含必需氨基酸赖氨酸(Lys)、蛋氨酸(Met)、苯丙氨酸(Phe)、苏氨酸(Thr)、缬氨酸(Val)含量都有不同程度的升高,分别增加了 127.78%、68.18%、16.67%、11.67%,发酵黄粉虫粪与氮肥配施可以显著提高谷子赖氨酸(Lys)含

量,弥补了常规小米赖氨酸含量较低的不足;在同一尿素水平下,随着生物有机肥施用的增加这 5 种氨基酸含量均增加;与常规施肥处理相比,减氮配施有机肥缓解了谷子生长后期脱肥,增加了谷子穗期的养分供给。戴平安等^[24]研究表明,适当增加穗肥比例可提高稻谷籽粒中必需氨基酸含量,其中异亮氨酸和亮氨酸含量增加较多,赖氨酸次之。本试验中,必需氨基酸含量增加最多的是赖氨酸(Lys),其次是蛋氨酸(Met)、苏氨酸(Thr)。与 N₄ 相比,有机无机肥配施处理的非必需氨基酸脯氨酸(Pro)、酪氨酸(Tyr)、精氨酸(Arg)、半胱氨酸(Cys)含量都有不同程度的降低,分别降低 37.50%、26.26%、9.48%、24.31%;并且在相同施肥水平下,发酵黄粉虫粪施肥处理的这 4 种氨基酸含量均低于生物有机肥配施处理。相较于 N₂,尿素与有机肥配施处理鲜味氨基酸含量增加 3.44%~3.54%,甜味氨基酸含量增加 1.72%~3.75%,其中 N₁A₁、N₁B₁、N₁B₂、N₂B₁ 处理氨基酸差值较大,减氮配施有机肥提高了小米鲜味。

蛋白质中的氨基酸达到一定比例才能被人体

表 7 不同施肥处理的小米必需氨基酸 RAA 和 RC(FAO/WHO 标准)

Table 7 Essential amino acids RAA and RC of millet under different fertilization treatments (FAO/WHO standard)

蛋白质来源 Protein source	蛋白质 特征值 Protein characteristic values	氨基酸 Amino acid						
		Ile	Leu	Lys	Thr	Val	Met+Cys	Phe+Tyr
CK	RAA	0.68	3.68	0.46	1.06	0.97	1.42	2.39
	RC	0.44	2.42	0.30	1.09	0.63	0.93	1.57
N ₁	RAA	0.74	3.70	0.48	1.08	1.02	1.47	2.39
	RC	0.47	2.38	0.31	1.05	0.66	0.94	1.54
N ₂	RAA	0.73	3.62	0.45	1.02	0.98	1.51	2.44
	RC	0.47	2.36	0.29	1.04	0.64	0.99	1.59
N ₃	RAA	0.72	3.63	0.48	0.92	0.95	1.28	2.49
	RC	0.48	2.43	0.32	0.97	0.63	0.85	1.67
N ₄	RAA	0.75	3.88	0.33	0.89	0.91	1.03	2.24
	RC	0.52	2.71	0.23	0.98	0.63	0.72	1.57
A ₁	RAA	0.66	3.77	0.44	0.99	1.03	1.70	2.54
	RC	0.42	2.37	0.28	0.96	0.65	1.07	1.60
A ₂	RAA	0.68	3.86	0.45	1.04	1.05	1.74	2.58
	RC	0.42	2.37	0.28	1.00	0.64	1.07	1.58
B ₁	RAA	0.71	3.80	0.42	0.98	1.05	1.83	2.57
	RC	0.44	2.34	0.26	0.94	0.65	1.13	1.59
B ₂	RAA	0.69	3.78	0.45	1.02	1.03	1.68	2.52
	RC	0.43	2.37	0.28	0.99	0.64	1.05	1.58
N ₁ A ₁	RAA	0.65	3.65	0.45	1.05	0.96	1.46	2.47
	RC	0.42	2.39	0.30	1.09	0.63	0.95	1.62
N ₁ A ₂	RAA	0.65	3.77	0.47	1.06	1.01	1.56	2.53
	RC	0.41	2.39	0.30	1.04	0.64	0.99	1.60
N ₂ A ₁	RAA	0.68	3.75	0.42	0.98	1.01	1.66	2.46
	RC	0.43	2.40	0.27	0.98	0.64	1.06	1.57
N ₂ A ₂	RAA	0.76	3.88	0.47	1.04	1.10	1.85	2.61
	RC	0.46	2.32	0.28	0.95	0.66	1.10	1.56
N ₁ B ₁	RAA	0.62	3.72	0.46	1.07	0.99	1.49	2.60
	RC	0.40	2.38	0.29	1.07	0.64	0.95	1.66
N ₁ B ₂	RAA	0.71	3.70	0.47	1.05	0.99	1.49	2.4
	RC	0.46	2.40	0.30	1.06	0.64	0.96	1.55
N ₂ B ₁	RAA	0.69	3.79	0.47	1.08	1.01	1.53	2.51
	RC	0.43	2.40	0.30	1.08	0.64	0.97	1.58
N ₂ B ₂	RAA	0.70	3.74	0.44	1.01	1.01	1.68	2.49
	RC	0.44	2.37	0.28	1.00	0.64	1.06	1.58

吸收和利用。当蛋白质中的某种氨基酸不能达到这个比例时,即使食物中的蛋白质含量很高,也不能被人体充分利用。近年来,已有对氨基酸营养品质的研究表明,氨基酸营养品质的主要表征指蛋白质含量和氨基酸组成及其平衡状态,氨基酸营养品质的关键决定点是必需氨基酸含量的多少^[25-27]。本试验中,较高的有机肥替代比例条件下可以提升小米总氨基酸含量、必需氨基酸含量以及鲜味氨基酸在总氨基酸含量的占比,蛋白质贴近度和氨基酸比值系数也较高。减氮配施有机肥处理小米 EAA 增加了 0.43%~7.11%,EAA/TAA 在 0.40~0.41,EAA/NEAA 在 0.61~0.65;减氮配施有机肥处理小米的贴近度在 0.824~0.838,相较于 N_4 处理贴近度增加了 3.26%~5.01%,与 FAO/WHO 提出的 EAA/TAA=0.40,EAA/NEAA=0.60 的建议值接近,说明减氮配施有机肥处理的小米中的必需氨基酸含量增多,营养价值升高更加均衡。当 RAA/RC=1,显示出小米蛋白与模式蛋白中 EAA 的推荐值更加接近。当 RC>1,则 EAA 超过了标准模式,相对过剩;当 RC<1,则 EAA 低于标准,相对不足^[27]。SRC 代表了食物蛋白质相对营养价值,SRC 越大,表明在生理平衡分析中,必需氨基酸所做的贡献越大,营养价值就会更高^[26]。EAAI 也是评价蛋白质的指标之一,EAAI=1,证明此蛋白质越优质^[28],相应的营养价值越高,被人体所吸收的比例就越大。相较于其他施肥处理高有机肥替代比例处理小米蛋白质质量提升明显,其原因可能是有机肥所含营养元素的形态、数量以及比例均衡,可以为作物提供更全面、平衡的养分,为实现作物的高品质提供了物质基础^[29-30]。也有研究表明,有机无机肥配施对作物品质的提升效应主要取决于供肥模式,其中供氮模式尤为重要,在较高的有机肥替代比例下,较温和的供氮模式可以提高果实中蛋白质质量,供氮速率过快则不利于蛋白质质量升高^[31-33]。本试验研究结果表明,减氮配施有机肥处理小米的 SRC 和 EAAI 升高,相较于 N_2 处理分别升高 9.22%~24.73% 和 5.41%~93.24%。通过对不同施肥处理的小米 SRC、EAAI 和贴近度的氨基酸评价筛选出氨基酸评价价值较优的处理为 N_1B_1 、 N_1A_2 和 N_2A_2 ,其必需氨基酸组成模式更接近标准蛋白质氨基酸组成模式,理论上更容易被人体吸收和利用。

4 结 论

有机、无机肥配施改善了小米氨基酸的组成,提高了必需氨基酸(EAA)含量,与 N_4 相比,有机无机肥配施处理的 EAA 含量增加了 13.79%~22.41%,EAA/TAA 和 EAA/NEAA 分别接近 0.400 和 0.600,尿素 180 kg/hm² + 生物有机肥 7 500 kg/hm² 处理(N_2A_2)总氨基酸、必需氨基酸、鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量分别增加 7.25%、7.11%、6.47% 和 32.7%,17 个施肥处理的各类呈味氨基酸含量由高到低均表现为减氮配施有机肥处理(N_1A_1 、 N_1A_2 、 N_1B_1 、 N_1B_2 、 N_2A_1 、 N_2A_2 、 N_2B_1 、 N_2B_2)>单施有机肥处理(A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2)> N_1 、 N_2 >CK> N_3 、 N_4 ,其中 N_1A_1 、 N_1B_1 、 N_1B_2 、 N_2B_1 的氨基酸差值较大,提高了小米鲜味。通过氨基酸比值系数法发现,在不同施肥处理中,异亮氨酸(Ile)和赖氨酸(Lys)的氨基酸比值系数均<1,说明这 2 种氨基酸在小米中较缺乏,是主要限制氨基酸;Leu(亮氨酸)和苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)的 RC 均>1,说明这 2 种氨基酸在小米中含量过剩;有机无机肥配施处理小米必需氨基酸与全鸡蛋蛋白的贴近度在 0.823~0.834,与 N_4 相比贴近度增加了 4.26%~4.51%,有机肥有助于改善小米氨基酸的比例,改善了小米蛋白营养价值; N_1A_2 、 N_2B_1 、 N_1B_1 、 N_1A_2 和 N_2A_2 的 SRC 较大。因此,减氮配施有机肥处理小米营养价值更高。

参考文献 References

- [1] 黄伟,王德权,裴晶晶,张雅莉,冯小磊,张晓磊.不同小米品种主要营养成分及氨基酸组分分析[J].东北农业科学,2023,48(1):91-96
Huang W, Wang D Q, Pei J J, Zhang Y L, Feng X L, Zhang X L. Evaluation of main nutrients and amino acid of different millet varieties [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2023, 48(1): 91-96 (in Chinese)
- [2] 张竹青,杨雅俊,李万红.糙小米与小米营养价值及食味品质的比较研究[J].粮食与食品工业,2014,21(2):22-23,26
Zhang Z Q, Yang Y J, Li W H. Comparative study on nutritional value and eating quality of coarse millet and millet [J]. *Cereal and Food Industry*, 2014, 21(2): 22-23, 26 (in Chinese)
- [3] 李香宇,张星里,夏杜菲,赵磊,曹增强,陈向阳,陈阜,文新亚.喷施新型腐植酸对谷子籽粒产量和品质的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(6):68-76
Li X Y, Zhang X X, Xia D F, Zhao L, Cao Z Q, Chen X Y, Chen F, Wen X Y. Effect of spraying of new-type humic on yield and quality of millet grains [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 68-76

- (in Chinese)
- [4] Kumar A, Rani M, Mani S, Shah P, Singh D B, Kudapa H, Varshney R K. Nutritional significance and antioxidant-mediated antiaging effects of finger millet: Molecular insights and prospects [J/OL]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, (2021-10-05). DOI:10.3389/fsufs.2021.684318
- [5] Sarma S M, Khare P, Jagtap S, Singh D P, Baboota R K, Podili K, Boparai R K, Kaur J, Bhutani K K, Bishnoi M, Kondepudi K K. Kodo millet whole grain and bran supplementation prevents high-fat diet induced derangements in a lipid profile, in-inflammatory status and gut bacteria in mice[J]. *Food and Function*, 2017, 8(3):1174-1183
- [6] 辛卓霖,李鸿萱,韩宛君,许鑫,蒋黎明,李良. 制作工艺及干燥方法对速食小米粥品质的影响探究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(4):283-287,305
Xin Z L, Li H X, Han W J, Xu X, Jiang L M, Li L. Effect of processing technology and drying methods on the quality of instant millet gruel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(4):283-287,305 (in Chinese)
- [7] 刘宇杰,陈银焕,杨修仕,任贵兴. 小米营养及功能成分研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(5):1-3
Liu Y J, Chen Y H, Yang X S, Ren G X. Research progress on nutrition and functional components of millet[J]. *Journal of Cereals and Oils*, 2020, 33(5):1-3 (in Chinese)
- [8] Matsumoto K, Koba T, Hamada K, Sakurai M, Higuchi T, Miyata H. Branched-chain amino acid supplementation attenuates muscle soreness, muscle damage and inflammation during an intensive training program [J]. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2009, 49(4):424-431
- [9] 林金剑,朱克瑞. 浅谈杂粮的营养保健作用[J]. *粮食与食品工业*, 2011, 18(6):34-38
Lin J J, Zhu K R. Discussion on the nutritional and health care function of miscellaneous grains[J]. *Cereal and Food Industry*, 2011, 18(6):34-38 (in Chinese)
- [10] 夏凡,李翠芳,王志刚,王超,宋晓彦,孙晶京,穆婷婷,杨武德,冯美臣. 施用有机肥对谷子产量、品质及经济效益的影响[J]. *山西农业科学*, 2023, 51(3):278-284
Xia F, Li C F, Wang Z G, Wang C, Song X Y, Sun J J, Mu T T, Yang W D, Feng M C. Effects of organic fertilizer application on yield, quality and economic benefit of foxtail millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2023, 51(3):278-284 (in Chinese)
- [11] 孙文彦,尹红娟,唐继伟,温延臣,田昌玉,徐久凯,赵秉强. 玉米子粒产量及氨基酸含量对氮肥类型和用量的响应[J]. *玉米科学*, 2023, 31(2):116-124
Sun W Y, Yin H J, Tang J W, Wen Y C, Tian C Y, Xu J K, Zhao B Q. Response of maize grain yield and amino acid content to nitrogen types and rates [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(2):116-124 (in Chinese)
- [12] 黄清梅,江鲁华,赵自仙,高祥扩,鲁用强,冯素芬,李国平,吕涛,赵辉. 不同施肥处理对玉米的氨基酸组分及脂肪酸组分的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(5):2062-2065
Huang Q M, Jiang L H, Zhao Z X, Gao X K, Lu Y Q, Feng S F, Li G P, Lv T, Zhao H. Effects of fertilizer application on amino acids and fatty acids of maize [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(5):2062-2065 (in Chinese)
- [13] 彭熙,张丽敏,李安定,蔡国俊,吴应海,张孙健. 施肥对百香果氨基酸的组分影响及营养评价[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(4):881-885
Peng X, Zhang L M, Li A D, Cai G J, Wu Y H, Zhang S J. Effects of fertilization on the amino acid composition and nutrition evaluation of passion fruit[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(4):881-885 (in Chinese)
- [14] 范文洵. 蛋白质食物的营养评价[M]. 北京:人民卫生出版社,1984
Fan W X. *Nutritional Evaluation of Protein Foods*[M]. Beijing:People's Health Publishing Press,1984
- [15] 陈学存. 应用营养学[M]. 北京:人民卫生出版社,1984
Chen X C. *Applied Nutrition*[M]. Beijing:People's Health Publishing Press,1984
- [16] 朱圣陶,吴坤. 蛋白质营养价值评价:氨基酸比值系数法[J]. *营养学报*, 1988, 10(2):187-190
Zhu S T, Wu K. Nutritional evaluation of protein: Ratio coefficient of amino acid [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 1988, 10(2):187-190 (in Chinese)
- [17] 罗凡,龚雪蛟,张厅,杜晓. 氮磷钾对春茶光合生理及氨基酸组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1):147-155
Luo F, Gong X J, Zhang T, Du X. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on photo-biological characteristics and amino acid components of tea plants in spring[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1):147-155 (in Chinese)
- [18] 赵艳岭. 中期氮肥调控影响水稻产量及稻米品质的生理机制[D]. 南京:南京农业大学,2014
Zhao Y L. Effect of nitrogen on rice yield and quality and its physiological mechanism[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2014 (in Chinese)
- [19] 刘红明,龙春瑞,潘艳华,付小猛,毛加梅,杜玉霞,岳建强,李进学. 化肥减量配施有机肥对柠檬树体生长、果实产量及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(24):42-46
Liu H M, Long C R, Pan Y H, Fu X M, Mao J M, Du Y X, Yue J Q, Li J X. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer application on growth, fruit yield and quality of lemon trees [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(24):42-46 (in Chinese)
- [20] 唐宇,曹亚军,欧庆宇,张昌义,刘国军,熊晓莉. 黄粉虫粪有机肥对冷水花生长的影响[J]. *重庆工商大学学报:自然科学版*, 2021, 38(5):17-22
Tang Y, Cao Y J, Ou Q Y, Zhang C Y, Liu G J, Xiong X L. Effect of tenebrio molitor organic fertilizer on the growth of *Pilea notata* C H Wrigth [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2021, 38(5):17-22 (in Chinese)
- [21] 吴霞玉,李盼,韦金贵,范虹,何蔚,樊志龙,胡发龙,柴强,殷文. 减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(4):1065-1079
Wu X Y, Li P, Wei J G, Fan H, He W, Fan Z L, Hu F L, Chai Q, Yin W. Effect of reduced irrigation and combined application of organic and chemical fertilizers on photosynthetic physiology, grain yield and quality of maize in northwestern irrigation areas [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4):1065-1079 (in Chinese)
- [22] 谭德水. 长期施肥对北方典型土壤钾素及作物产量、品质的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2007
Tan D S. Effect of long-term application of potassium on soil K, crop yield and quality in selected soils from North China[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2007 (in Chinese)
- [23] 古世禄,古晓红,耿聚平. 不同土壤与海拔高度对谷子(粟)蛋白质氨基酸组成的影响[J]. *生态农业研究*, 2000, 8(3):32-35
Gu S L, Gu X H, Geng J P. Effects of different soils and altitudes on the composition of amino acids in foxtail millet[J]. *Eco-agriculture Research*, 2000, 8(3):32-35 (in Chinese)
- [24] 戴平安,郑圣先,李学斌,聂军,易国英,袁迪仁,黄科延. 穗肥氮施用比例对两系杂交水稻氮素吸收、籽粒氨基酸含量和产量的影响[J]. *中国水稻科*

- 学, 2006, 20(1): 79-83.
- Dai P A, Zheng S X, Li X B, Nie J, Yi G Y, Yuan D R, Huang K Y. Effect of proportion of nitrogen fertilizer for promoting panicle development on nitrogen uptake, grain amino acid contents and grain yield of two-line hybrid rice [J]. *Chinese Journal Rice Sciences*, 2006, 20(1): 79-83 (in Chinese)
- [25] 舒军, 王啸旗, 郭宁馨, 李旭凯, 高建华, 王兴春, 侯思宇, 赵雄伟. 谷子不同核心种质的小米氨基酸组分积累特性分析及其评价[J]. 山西农业科学, 2022, 50(12): 1622-1630
- Shu J, Wang X Q, Guo N X, Li X K, Gao J H, Wang X C, Hou S Y, Zhao X W. Analysis and evaluation of the accumulation characteristics of amino acid components in different core germplasms of foxtail millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(12): 1622-1630 (in Chinese)
- [26] 张林生. 小麦种子氨基酸的评价[J]. 麦类作物学报, 1996, 16(3): 28-30
- Zhang L S. Evaluation of amino acids in wheat seeds [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 1996(3): 28-30 (in Chinese)
- [27] 杨永涛, 潘思源, 靳欣欣, 高仿, 田英姿, 丁晓丽. 不同品种核桃的氨基酸营养价值评价[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 207-212
- Yang Y T, Pan S Y, Jin X X, Gao F, Tian Y Z, Ding X L. Amino acid composition and nutritional evaluation of different varieties of walnut[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 207-212 (in Chinese)
- [28] 张爱霞, 刘敬科, 赵巍, 李少辉, 张佳丽, 刘莹莹, 张玉宗. 小米加工副产物的成分分析和营养评价[J]. 河北农业科学, 2017, 21(1): 73-76
- Zhang A X, Liu J K, Zhao W, Li S H, Zhang J L, Liu Y Y, Zhang Y Z. Component analysis and nutritional evaluation on the by-product of millet processing[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(1): 73-76 (in Chinese)
- [29] 王华静, 吴良欢, 陶勤南. 有机营养肥料研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 110-114
- Wang H J, Wu L H, Tao Q N. Advances in the study of organic nutrition fertilizers[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(1): 110-114 (in Chinese)
- [30] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240
- Zhou J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 234-240 (in Chinese)
- [31] 吴春艳, 陈义, 许育新, 王家玉. 长期定位试验中施肥对稻米品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(4): 256-260
- Wu C Y, Chen Y, Xu Y X, Wang J Y. Effect of fertilization on rice grain quality in a long-term fertilizer experiment [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(4): 256-260 (in Chinese)
- [32] 刘建, 魏亚凤, 吴魁, 徐少安. 有机无机 N 不同配比与中梗稻米品质关系的研究[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2004, 22(3): 246-250
- Liu J, Wei Y F, Wu K, Xu S A. Relationship between different ratio of organic nitrogen and mineral nitrogen and grain quality of mid-season rice [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University: Agricultural Science*, 2004, 22(3): 246-250 (in Chinese)
- [33] 李卫华, 张东海. 小麦籽粒形成期间氨基酸含量的平衡性分析[J]. 种子, 2000, 19(2): 21-23
- Li W H, Zhang D H. The Balance analysis of the amino acid content in seed filling period of wheat[J]. *Seed*, 2000, 19(2): 21-23 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 杜慧平, 副编审(副研究员), 山西农业大学《山西农业科学》编辑部主任、常务副主编。兼任中国农学会农业科技期刊委员会委员、山西省科技期刊编辑学会理事、山西省期刊协会高校期刊专委会理事。主要从事学术期刊出版、新闻传播学及土壤肥料研究, 先后主持承担和参与省级项目 10 余项, 获山西省农村技术承包奖 1 项, 参与制定山西省地方标准 1 项, 主持和参与审定玉米品种 6 个。发表学术论文 10 余篇。曾多次获科技期刊优秀主编、优秀党务工作者、优秀共产党员等荣誉称号。



通讯作者简介: 杜慧玲, 教授, 山西农业大学基础部博士生导师, 国家林业和草原局院校教材建设专家委员会委员及教材建设专家, 山西省谷子产业技术体系岗位专家。主要从事谷子有机旱作和生物强化功能性谷子研究, 先后主持承担和参加省级及以上研究项目多项, 获山西省科技进步二等奖 1 项, 获省级教学成果二等奖 1 项。在《中国农业科学》《植物营养与肥料学报》《农业工程学报》《光谱学与光谱分析》等国家级及 SCI 期刊发表学术论文 50 余篇, 主编和副主编出版多部国家级和省部级规划教材。被评为山西省省级教学名师, 山西省学术技术带头人, 山西省“三晋英才”拔尖骨干人才。