DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251224006
引用格式: 颜惠芬, 刘超烽, 康蕊, 等. 海南 4 种竹笋营养品质分析与综合评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 245–253.
YAN HF, LIU CF, KANG R, *et al*. Analysis and comprehensive evaluation of the nutritional quality of 4 kinds of bamboo shoots in Hainan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 245–253. (in Chinese with English abstract).

海南 4 种竹笋营养品质分析与综合评价

颜惠芬[1,2], 刘超烽[1,2], 康　蕊[1,2], 王　儒[1,2], 符郁馥[1,2], 谷满屯[1,2], 韦　盈[1,2*]

[1. 海南省检验检测研究院食品检验检测中心, 海口　570314; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(热带果蔬质量与安全), 海口　570314]

摘　要: 目的　探究海南野生刺笋、麻笋、甜笋、毛竹笋的鲜笋以及水煮、浸泡 3 d 后的水分、灰分、蛋白质、脂肪、14 种矿物质元素、18 种氨基酸的含量差异及变化, 并对其含量进行综合评价。**方法**　采用电感耦合等离子体质谱法测定矿物质元素含量、液相色谱-串联质谱法测定氨基酸含量以及其他国家标准方法测定营养成分含量, 并进行显著性分析、氨基酸比值分析以及采用氨基酸评分(amino acid score, AAS)、氨基酸化学评分(chemical score, CS)、必需氨基酸比值系数(ratio coefficient, RC)和比值系数分(score of ratio coefficient, SRC)对蛋白质营养价值进行综合评价。**结果**　4 种竹笋经过水煮或浸泡 3 d 后营养成分都存在不同程度的流失。野生刺笋鲜笋的蛋白质含量(2.55 g/100 g)、K 含量(4530.87 mg/kg)、Ca 含量(450.98 mg/kg)、Mg 含量(191.61 mg/kg)、P 含量(638.39 mg/kg)、Fe 含量(5.42 mg/kg)、Zn 含量(15.64 mg/kg)、Cu 含量(2.26 mg/kg)明显高于其他 3 个品种。4 种竹笋有害元素 As、Pb、Cd、Cr、Hg 含量均在国家允许范围内。4 种竹笋氨基酸总量在 673.27~1084.21 mg/100 g 之间, 通过必需氨基酸与氨基酸总量比值和必需氨基酸和非必需氨基酸比值分析, 野生刺笋的必需氨基酸与氨基酸总量比值和必需氨基酸和非必需氨基酸比值分别为 0.40 和 0.67, 达到参考模式 0.40 和 0.60 的标准, 参考 AAS 和 CS, 野生刺笋的营养价值相对于其他 3 种竹笋要好, 具有很高的开发价值, 但结合 RC 和 SRC 值分析, 毛竹笋的必需氨基酸组成较其他 3 个品种更加平衡合理, 可以对其充分利用。**结论**　4 种竹笋品种间的营养差异显著, 其营养价值各有优劣。野生刺笋蛋白质、脂肪、K、Ca、Mg、P、Fe、Zn、Cu 含量均高于其他 3 种竹笋。野生刺笋的氨基酸供给能力最优, 毛竹笋、麻笋、甜笋的氨基酸组成更均衡。

关键词: 竹笋; 营养成分; 氨基酸评价; 综合评价

Analysis and comprehensive evaluation of the nutritional quality of 4 kinds of bamboo shoots in Hainan

YAN Hui-Fen[1,2], LIU Chao-Feng[1,2], KANG Rui[1,2], WANG Ru[1,2], FU Yu-Fu[1,2], GU Man-Tun[1,2], WEI Ying[1,2*]

收稿日期: 2025-12-24
基金项目: 国家市场监督管理总局重点实验室(热带果蔬质量与安全)自主研究课题项目(ZZ-2024024)
第一作者: 颜惠芬(1986—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 842969631@qq.com
***通信作者:** 韦盈(1988—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 165084600@qq.com

(1. *Institute of Food Testing*, *Hainan Academy of Inspection and Testing*, *Haikou* 570314, *China*; 2. *Key Laboratory of Tropical Fruits and Vegetables Quality and Safety*, *State Administration for Market Regulation*, *Haikou* 570314, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the differences and changes in moisture, ash, protein, fat, 14 kinds of mineral elements and 18 kinds of amino acids in fresh, boiled and soaked (3 days) wild prickly bamboo shoots, hemp shoots, sweet bamboo shoots and hairy bamboo shoots, and comprehensively evaluate their content. **Methods** The content of mineral elements was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, amino acids were determined by liquid chromatography-tandem mass spectrometry, and other nutrients were determined using national standard methods. Significance analysis and amino acid ratio analysis were performed. The protein nutritional value was comprehensively evaluated using amino acid score (AAS), chemical score (CS), ratio coefficient of essential amino acids (RC) and score of ratio coefficient (SRC). **Results** The nutritional components of the 4 kinds of bamboo shoots were lost to varying degrees after being boiled or soaked for 3 days. The protein content (2.55 g/100g), K content (4530.87 mg/kg), Ca content (450.98 mg/kg), Mg content (191.61 mg/kg), P content (638.39 mg/kg), Fe content (5.42 mg/kg), Zn content (15.64 mg/kg) and Cu content (2.26 mg/kg) of wild prickly bamboo shoots were significantly higher than the other 3 varieties. The content of harmful elements As, Pb, Cd, Cr and Hg in the 4 kinds of bamboo shoots was within the national allowable range. The total amino acid content of 4 kinds of bamboo shoots ranged from 673.27 to 1084.21 mg/100 g. Through analysis of the essential amino acid/total amino acid and essential amino acid/non essential amino acid ratios, the essential amino acid/total amino acid and essential amino acid/non essential amino acid of wild prickly bamboo shoots were 0.40 and 0.67, respectively, meeting the standards of reference modes 0.40 and 0.60. Referring to AAS and CS, the nutritional value of wild prickly bamboo shoots was better than that of the other 3 kinds of bamboo shoots and had high development value. However, based on the analysis of RC and SRC values, the essential amino acid composition of hairy bamboo shoots was more balanced and reasonable than that of the other 3 varieties, and it could be fully utilized. **Conclusiou** The nutritional differences among the 4 kinds of bamboo shoots varieties are significant, and their nutritional values has their own advantages and disadvantages. The protein, fat, K, Ca Mg, P, Fe, Zn, and Cu content of wild prickly bamboo shoots are all higher than those of the other three bamboo shoots. The amino acid supply capacity of wild prickly bamboo shoots is optimal, and the amino acid composition of hairy bamboo shoots, hemp shoots and sweet bamboo shoots is more balanced.

KEY WORDS: bamboo shoot; nutritional components; amino acid evaluation; comprehensive evaluation

0 引 言

海南四季如春, 气候温暖湿润, 适合多种竹类及类笋植物生长。竹笋是海南市场上的四季蔬菜。竹笋按来源分为刺竹笋(*Bambusa sinospinosa* McClure)、麻竹笋(*Dendrocalamus latiflorus*)、甜笋(*Phyllostachys elegans* McClure)和毛竹笋(*Phyllostachys edulis*)。刺竹笋是野生野长, 其他 3 种是人工种植。毛竹笋是一种非常有价值的食物资源, 因其独特的风味和营养价值而闻名[1]。麻竹笋是一个重要的竹种, 具有经济和生态方面的综合价值[2]。竹笋是一种美味且营养丰富的森林蔬菜[3], 且具有食药两用的功能, 富含蛋白质、膳食纤维、氨基酸及人体必需微量元素等营养元素, 以及许多有益于健康的生物活性物质, 具有抗氧化性、抗炎症、降压降脂、保护心脑血管、抗糖尿病、改善肠道微生物菌群、促进消化预防便秘等药用价值[4−8]。竹笋正日益受到全球健康食品市场的青睐, 筛选优质品种可为竹笋的规模化、标准化、商业化种植提供科学依据与实践参考。

目前, 对竹笋的研究主要有采后保鲜控制品质[9]、营养成分[10]及口感[11−12]等。对不同品种竹笋的营养品质的比较也已经有一些报道, 但是竹笋的营养价值和食味品质不仅受品种遗传因素的影响, 同时也受气候因素和土壤质地等的影响[13]。陈中爱等[14]对贵州省内的方竹笋、大头笋等 5 种竹笋的主要营养成分、氨基酸及矿物质等进行比较, 发现方竹笋的蛋白质含量(3.73 g/100 g)、K 含量(4031.52 mg/kg)、Ca 含量(276.82 mg/kg)、马蹄笋的粗纤维含量(1.59 g/100 g)显著高于其他 4 个品种。甜竹笋 Mg、Fe、Mn 含量较其他竹笋高, 分别为 153.16、5.57、17.46 mg/kg, 大头笋和甜笋含有少量 Se。陈松河等[15]对福建省华安县的 5 种牡竹属笋用竹竹笋营养成分进行了比较, 发现 5 种竹笋氨基酸含量差别

很大。檀笑阳等[16]对四川长宁县世纪竹园的 7 种苦味笋的蛋白质营养品质差异进行分析, 发现 7 种苦味竹笋的蛋白质含量在 1.56~2.46 g/100 g, 其中慈竹笋的蛋白质含量最高, 为 2.46 g/100 g; 7 种苦味竹笋的氨基酸总量在 1164.33~1722.67 mg/100 g, 亮氨酸是 7 种苦味竹笋中含量最高的必需氨基酸, 天冬氨酸是 7 种苦味竹笋中含量最高的非必需氨基酸。这些研究都充分说明了竹笋的营养价值很高, 而对海南本地的野生刺笋、人工种植的甜笋、麻笋、毛竹笋的营养价值的研究尚鲜见报道。

因此, 本研究将对海南 4 种常见食用竹笋分鲜笋、水煮熟和浸泡 3 d 3 种方式处理, 并对其主要营养成分、矿物质元素、氨基酸含量以及其安全性进行研究。通过必需氨基酸与氨基酸总量比值(essential amino acid/total amino acid, EAA/TAA)和必需氨基酸与非必需氨基酸比值(essential amino acid/nonessential amino acid, EAA/NEAA)分析, 并采用营养学的分析方法氨基酸评分(amino acid score, AAS)、氨基酸化学评分(chemical score, CS)、必需氨基酸比值系数(ratio coefficient, RC)和比值系数分(score of ratio coefficient, SRC)对必需氨基酸组成进行评价, 以期为人们日常的膳食选择、优质竹笋的栽培、推广及产品发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

野生刺笋采自海南省文昌市; 麻竹笋和甜笋采自海南省定安县; 毛竹笋采自海南省五指山市; 竹笋样品均采自 2024 年 5 月至 8 月。

盐酸、硫酸(分析纯, 广州化学试剂厂); 硝酸(电子级 G3)、无水乙醇、乙醚、甲酸铵、石油醚(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司); 乙腈(色谱纯, 诺尔施公司); 汞单元素标液(质量浓度 50.0 ng/L, 中国计量科学研究院); 多元素混合元素标准溶液(质量浓度 10 μg/mL, 美国 IV 公司); 水中 21 种氨基酸混合标准溶液(浓度 1 mmol/L, 坛墨质检科技股份有限公司)。

1.2　仪器与设备

DHG-9091A 恒温干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); SXL-1016 马弗炉(上海精宏公司); HH.S11-4-5 恒温水浴锅(上海龙跃公司); MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司); Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司); Kjeltec8400 全自动凯氏定氮仪(美国 FOSS 公司); 7900 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司); Waters ACQUITY UPLC I-Class Plus/Xevo TQ-XS 液相色谱-质谱联用仪、Waters ACQUITY UPLC® BEH HILIC 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　样品前处理方法

将获得的新鲜嫩竹笋样品顺丰冷链运输至实验室。剥去外层的笋壳及不可食部位, 切片备用。将切片好的竹笋均匀分成 4 份, 每份约 1500 g, 分 4 种方式处理: 直接打碎; 蒸馏水煮沸 15 min, 冷却沥干水后打碎; 蒸馏水密封浸泡 3 d, 每天更换水浸泡, 沥干水后打碎; 置于烘箱中, 在 100 ℃下烘 20 min, 然后在 75 ℃下烘干, 取出并粉碎至全部通过 40 目筛, 保存于干燥样品瓶中备用。

1.3.2　成分含量测定方法

水分测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法; 灰分测定参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》第一法; 蛋白质测定参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法; 脂肪测定参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第二法; 矿物质元素含量参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法; 氨基酸含量测定, 前处理方法参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》中的酸水解方法, 利用液相色谱-串联质谱仪法测定。

1.3.3　氨基酸营养评价

参照檀笑阳等[16]的方法, 计算 AAS、CS、RC 和 SRC, 计算如公式(1)~(4)。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)/世界卫生组织(World Health Organization, WHO)标准模式和全蛋标准模式必需氨基酸含量见表 1。

$$AAS=\frac{\text{待测蛋白质中某一必需氨基酸含量}}{\text{FAO/WHO模式中相应必需氨基酸含量}}\times 100 \quad (1)$$

$$CS=\frac{\text{待测蛋白质中某一必需氨基酸含量}}{\text{鸡蛋蛋白质中同种氨基酸含量}}\times 100 \quad (2)$$

$$RC=\frac{AAS}{AAS\text{均值}} \quad (3)$$

$$SRC=100-100\times CV \quad (4)$$

式中: 变异系数(coefficient of variation, CV)为 RC 的 CV, CV=标准差/均值。

表 1　FAO/WHO 以及全蛋标准模式必需氨基酸含量(g/100 g)

Table 1　Essential amino acid content of FAO/WHO and whole egg model (g/100 g)

模式	异亮氨酸	亮氨酸	赖氨酸	蛋氨酸+胱氨酸	苯丙氨酸+酪氨酸	苏氨酸	色氨酸	缬氨酸
FAO/WHO 模式	4.0	7.0	5.5	3.5	6.5	4.1	1.0	5.0
全蛋标准模式	5.4	8.6	7.0	5.7	9.3	4.7	1.7	6.6

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示。采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行处理计算, 应用 SPSS 27.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 基本成分分析

如表 2 所示, 4 种竹笋的 3 种不同处理方式的水分含量均在92%以上, 且浸泡3 d>煮熟>鲜笋的水分含量, 它们之间差异显著(P<0.05)。灰分含量在 0.58~0.85 g/100 g之间, 各个品种之间差异显著(P<0.05), 但同一品种不同处理方式之间变化不明显, 与陈中爱等[14]的结果 0.58~0.97 g/100 g 和张佳佳等[17]的结果 0.65~0.87 g/100 g 接近。鲜笋蛋白质含量在 1.53~2.55 g/100g 之间, 与陈中爱等[14]的结果 1.93~3.73 g/100 g 接近; 与中国食物营养成分表[18]中, 不同品种鲜竹笋蛋白质含量 2.2~4.1 g/100 g 相比略低。不同品种间蛋白质含量差异显著(P<0.05), 其中, 野生刺笋的蛋白质含量明显高于其他 3 个品种, 其含量约为甜笋的 2 倍。因此, 野生刺笋的蛋白质含量优于毛竹笋、麻笋、甜笋。野生刺笋脂肪含量高于其他 3 个品种, 毛竹笋和甜笋的脂肪含量相近, 野生刺笋与麻笋之间差异显著。4 种鲜笋的脂肪含量为 0.38~0.43 g/100 g, 与中国食物营养成分表中[18], 不同品种鲜竹笋脂肪含量 0.1~0.4 g/100 g 类似。研究结果显示, 经浸泡、煮熟处理后, 竹笋中的蛋白质、脂肪均出现流失现象, 且两种加工处理方式引发的蛋白质、脂肪流失程度存在明显差异, 表明竹笋中蛋白质和脂肪对水浸、热加工的耐受性不同, 加工方式是影响竹笋中蛋白质和脂肪保留率的重要因素。

2.2 矿物质元素分析

由表 3 可知, 4 种竹笋的 14 种矿物质元素中, 常量元素 K、Ca、Mg、P 含量较高, 与其他元素含量不在同一数量级上, 特别是鲜笋 K 的含量, 在 3314.46~4530.87 mg/kg 之间。新鲜野生刺笋中 K、Ca、Mg、P 含量都比其他 3 个品种高, 特别是 Ca 含量比甜笋高出 4 倍。Ca 是人体必需的矿物质, 主要作用是构建骨骼与牙齿、维持神经肌肉正常功能、参与凝血过程、调节酶活性及支持心血管健康。竹笋因富含 Ca, 有助于预防骨质疏松、抽筋等问题。WANG 等[19]研究表明, K 是竹笋中含量最为丰富的常量元素。K 可以帮助维持细胞正常功能、调节体液平衡、支持神经和肌肉活动, 以及调节血压和心脏功能[20], 被称作一种可以保护心脏的蔬菜[14]。不同品种竹笋的 K、Ca、Mg、P 含量差异显著(P<0.05), 这可能与它们的品种及所种植的地理位置的土壤环境有关, 这 4 种竹笋来自海南不同的地区, 受所处环境的光照、温度、湿度等因素的影响不一样[13]。本研究中, K、Ca、Mg、P 含量整体上会随着蒸煮或浸泡而有所流失, 尤其是 K 与 Mg 的流失最为严重, 这就提示食者们为了保留更多的营养物质, 选择合适的前处理方式至关重要。

Fe、Zn、Cu 是人体健康至关重要的微量元素。野生刺笋鲜笋中微量元素 Fe、Zn、Cu 的含量比其他 3 种都高, 分别为: 5.42、15.64、2.26 mg/kg, 显著高于其他 3 个品种(P<0.05)。野生刺笋可作为补充 Fe 元素的来源。与 XIAN 等[21]对 100 种竹笋微量元素含量进行研究野表明, 大部分竹笋富含 Fe 和 Zn 是一致的。野生刺笋、毛竹笋、甜笋含有少量 Se, Se 是人体必需的微量元素, 它在人体中易被蛋白质吸收, 形成硒蛋白, 硒蛋白是重要的抗氧化剂, 它的抗氧化特性有助于防止自由基对细胞的损害[14,20]。

有害重金属元素 Cd 在野生刺笋与毛竹笋中均检测到, 麻笋中检测到 Pb, 但根据 GB 2762—2022《食品中污染物限量》中 Cd 的限量不超过 0.5 mg/kg, Pb 的限量不超过 0.1 mg/kg, 远低于国家标准, 说明本研究中虽然野生刺笋与毛竹笋中含有少量 Cd 元素, 麻笋中含有少量 Pb 元素, 但对其品质安全并没有影响。

综合 14 种矿物质元素的分析结果来看, 野生刺笋的常量元素 K、Ca、Mg、P, 微量元素 Fe、Zn、Cu 含量均处于较高水平, 其他 3 种竹笋矿物质元素亦种类齐全、含量丰富。蒸煮和浸泡均会造成竹笋矿物质元素流失, 因此应慎重选择前处理方式。矿物质元素对于身体生长发育、激

表 2 竹笋基本成分分析

Table 2 Analysis of the basic components of bamboo shoots

项目	野生刺笋			毛竹笋			麻笋			甜笋		
	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d
水分/%	92.81±0.21^{g}	94.31±0.11^{e}	95.24±0.26^{c}	92.66±0.15^{gh}	93.91±0.06^{f}	95.59±0.13^{b}	92.41±0.32^{h}	93.82±0.16^{f}	96.55±0.11^{a}	92.62±0.21^{gh}	94.85±0.22^{d}	96.46±0.18^{a}
灰分/(g/100 g)	0.78±0.01^{c}	0.74±0.01^{d}	0.72±0.02^{e}	0.85±0.01^{a}	0.81±0.01^{b}	0.78±0.01^{c}	0.61±0.01^{f}	0.58±0.01^{g}	0.58±0.01^{g}	0.81±0.01^{b}	0.78±0.01^{c}	0.78±0.01^{c}
蛋白质/(g/100 g)	2.55±0.02^{a}	2.19±0.03^{b}	2.03±0.02^{c}	1.76±0.01^{d}	1.38±0.01^{f}	1.33±0.02^{g}	1.75±0.01^{d}	1.38±0.01^{f}	0.75±0.01^{j}	1.53±0.01^{e}	1.13±0.02^{h}	1.01±0.02^{i}
脂肪/(g/100g)	0.43±0.01^{a}	0.41±0.01^{ab}	0.38±0.02^{cd}	0.40±0.01^{bc}	0.38±0.01^{cd}	0.37±0.01^{de}	0.38±0.01^{cd}	0.38±0.01^{cd}	0.35±0.01^{e}	0.40±0.01^{bc}	0.38±0.02^{cd}	0.38±0.01^{cd}

注: 同一行上标字母不相同表示差异显著(P<0.05), 表 3、表 4 同; 以鲜样计。

表 3　竹笋矿物质元素分析(mg/kg)

Table 3　Analysis of mineral elements in bamboo shoots (mg/kg)

分类	项目	野生刺笋			毛竹笋			麻笋			甜笋		
		鲜笋	煮熟	浸泡 3 d	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d	鲜笋	煮熟	浸泡 3 d
常量元素	K	4530.87±9.84^{a}	984.45±2.78^{h}	388.69±2.01^{j}	3740.66±3.61^{b}	2618.54±9.42^{e}	264.42±6.5^{l1}	3622.39±6.25^{c}	1536.55±9.74^{f}	612.16±3.52^{i}	3314.46±6.83^{d}	1407.61±5.29^{g}	296.66±1.94^{k}
	Na	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Ca	450.98±1.51^{a}	353.20±2.22^{c}	405.66±2.31^{b}	211.04±2.77^{d}	170.41±2.44^{f}	171.76±3.16^{ef}	168.39±1.19^{f}	132.17±1.61^{g}	174.65±1.74^{e}	109.94±2.64^{h}	95.31±2.16^{i}	168.62±1.63^{f}
	Mg	191.61±1.33^{a}	71.77±1.23^{f}	35.16±1.02^{h}	137.07±1.62^{b}	103.94±1.22^{e}	20.24±1.02^{j}	131.63±1.54^{c}	69.73±0.90^{f}	33.11±1.12^{h}	123.31±1.89^{d}	60.55±1.18^{g}	29.61±0.47^{i}
	P	638.39±1.08^{a}	327.39±1.71^{d}	303.56±1.65^{f}	361.38±3.09^{c}	304.71±1.08^{f}	281.07±0.64^{h}	428.33±1.98^{b}	286.00±1.54^{g}	196.89±1.49^{k}	322.83±1.34^{e}	235.62±1.57^{j}	246.3±1.05^{i}
微量元素	Fe	5.42±0.15^{a}	4.78±0.12^{b}	4.85±0.11^{b}	3.88±0.31^{d}	3.75±0.15^{d}	3.99±0.12^{d}	4.26±0.17^{c}	2.74±0.08^{e}	2.82±0.14^{e}	3.79±0.11^{d}	2.68±0.13^{e}	2.84±0.07^{e}
	Zn	15.64±0.04^{a}	10.52±0.02^{b}	5.68±0.02^{f}	9.48±0.04^{c}	8.21±0.81^{d}	4.24±0.06^{h}	10.72±0.03^{b}	6.55±0.03^{e}	2.94±0.01^{i}	7.97±0.05^{d}	4.97±0.01^{g}	2.14±0.02^{j}
	Cu	2.26±0.08^{a}	1.03±0.05^{e}	1.92±0.03^{b}	0.38±0.01^{gh}	0.32±0.02^{h}	0.45±0.01^{g}	1.34±0.05^{c}	0.6±0.02^{f}	1.16±0.02^{d}	1.29±0.06^{c}	0.66±0.11^{f}	0.95±0.05^{e}
	Se	0.04±0.00^{a}	0.02±0.01^{bc}	0.03±0.01^{ab}	0.02±0.01^{bc}	0.01±0.00^{c}	0.02±0.01^{bc}	/	/	/	0.02±0.01^{bc}	0.02±0.00^{bc}	0.02±0.00^{bc}
有害元素	As	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Pb	/	/	/	/	/	/	0.072±0.03^{ab}	0.094±0.05^{a}	0.093±0.02^{a}	/	0.085±0.01^{ab}	0.034±0.01^{b}
	Cd	0.0110±0.0100^{c}	0.0120±0.0000^{c}	/	0.0024±0.0000^{b}	0.0035±0.0100^{a}	/	/	/	/	/	/	/
	Cr	/	/	/	/	0.05±0.01^{b}	0.13±0.02^{a}	/	/	/	/	/	/
	Hg	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

注: /表示未检出, 以鲜样计。

素的维持与调节至关重要, 同时在肌肉和骨骼的构建中发挥关键作用。矿物质元素缺乏症也是全球最常见和最普遍的营养失衡问题[22]。综上, 竹笋是优质且安全的常量与微量矿物质元素来源, 该研究结果可为竹笋的食用与加工应用提供科学参考。

2.3　氨基酸含量及组成分析

氨基酸是一类两性有机化合物, 是生物功能大分子蛋白质的基本组成单位[23]。氨基酸在人体内扮演着重要角色, 尤其是人体不能合成的 8 种必需氨基酸[24]。由表 4 可知, 4 种竹笋都含有 18 种氨基酸(7 种必需氨基酸和 11 种非必需氨基酸), 说明竹笋中氨基酸含量比较丰富, 与 JI 等[25]研究中国东南地区 6 个竹种竹笋的营养成分得出的结论是一致的。其中包含儿童生长时期的必需氨基酸精氨酸和组氨酸。因此, 这 4 种竹笋均对儿童成长有益。4 种竹笋氨基酸总量在 673.27~1084.21 mg/100 g 之间, 其氨基酸组成呈显著性品种差异(P<0.05)。野生刺笋的氨基酸总量含量最高, 是麻笋的 1.61 倍, 表明野生刺笋的蛋白质储备更为丰富, 这可能与野生环境下竹笋的生长特性、养分积累效率有关。必需氨基酸含量在 236.81~433.84 mg/100 g 之间, 野生刺笋的必需氨基酸含量最高, 是麻笋的 1.83 倍, 说明野生刺笋的必需氨基酸供给能力更强。野生刺笋必需氨基酸中的赖氨酸含量是最高的 147.89 mg/100 g, 赖氨酸能够促进大脑发育, 是肝及胆的组成成分, 能促进脂肪代谢, 调节松果腺、乳腺、黄体及卵巢, 防止细胞退化。野生刺笋的非必需氨基酸含量也是最高的, 且 4 种竹笋的非必需氨基酸含量均高于对应必需氨基酸含量, 符合植物性蛋白质的氨基酸组成特点。4 种竹笋的必需氨基酸/非必需氨基酸值为 0.54~0.67, 必需氨基酸/氨基酸总量的值为 0.35~0.40, 两者都是以野生刺笋为最高, 其次是甜笋、毛竹笋、麻笋。野生刺笋的必需氨基酸/氨基酸总量值为 0.40 最高, 比常见蔬菜中的大白菜(0.26)、甘蓝(0.29)、香椿芽(0.32)等[26]高。野生刺笋必需氨基酸/非必需氨基酸值为 0.67, 比蔬菜中大白菜(0.35)、甘蓝(0.42)、芹菜(0.55)、小白菜(0.57)、香椿芽(0.47)等[26]高。根据 FAO/WHO 推荐模式, 必需氨基酸/非必需氨基酸在 0.60 以上, 必需氨基酸/氨基酸总量在 0.40 以上, 被认为最接近优质蛋白[27]。综合必需氨基酸/非必需氨基酸、必需氨基酸/氨基酸总量及必需氨基酸含量, 可知野生刺笋的蛋白质优于其他 3 种竹笋, 其次是甜笋、毛竹笋、麻笋。毛竹笋的总氨基酸含量虽然比甜笋高, 但必需氨基酸/非必需氨基酸和必需氨基酸/氨基酸总量值比甜笋低。说明总氨基酸含量高不一定具有高营养。

表 4 竹笋氨基酸组成及含量

Table 4 Amino acid composition and content of bamboo shoots

氨基酸	野生刺笋/(mg/100 g)	毛竹笋/(mg/100 g)	麻笋/(mg/100 g)	甜笋/(mg/100 g)
*异亮氨酸	57.94±0.83[a]	39.35±0.65[c]	36.64±2.14[d]	43.41±1.32[b]
*亮氨酸	78.55±1.10[a]	53.33±0.04[c]	42.89±1.97[d]	59.11±0.47[b]
*赖氨酸	147.89±2.09[a]	52.95±1.05[b]	40.67±2.98[c]	32.35±0.23[d]
*缬氨酸	73.49±0.46[a]	61.28±0.33[b]	41.86±1.26[d]	57.05±0.10[c]
*蛋氨酸	13.49±0.45[b]	6.27±0.02[c]	20.81±3.17[a]	16.24±0.17[b]
*苯丙氨酸	30.23±0.55[a]	25.08±0.34[b]	30.63±2.05[a]	30.02±0.22[a]
*苏氨酸	32.25±0.28[a]	28.76±0.45[b]	23.31±0.22[d]	26.83±0.32[c]
脯氨酸	71.21±1.59[a]	49.27±0.37[d]	59.65±1.01[c]	68.89±1.17[b]
丝氨酸	51.02±1.31[b]	36.93±1.34[d]	41.49±1.65[c]	60.37±1.83[a]
酪氨酸	27.47±0.44[a]	21.48±0.28[b]	18.32±1.38[c]	18.84±0.62[c]
丙氨	95.45±0.30[a]	91.29±1.80[b]	56.80±1.46[c]	42.86±0.71[d]
天冬氨酸	21.43±0.69[b]	33.02±0.20[a]	14.10±0.60[d]	19.91±0.49[c]
谷氨酸	42.89±1.10[a]	19.63±0.07[b]	16.68±1.23[c]	9.32±0.35[d]
甘氨酸	57.12±1.61[c]	31.62±1.23[d]	110.34±2.80[a]	77.35±1.10[b]
精氨酸	18.45±0.15[d]	41.29±0.51[b]	44.10±1.91[a]	41.46±0.30[b]
组氨酸	15.19±0.28[a]	11.49±0.21[b]	3.18±0.84[c]	3.75±0.01[c]
胱氨酸	0.94±0.07[a]	1.16±0.07[a]	1.04±0.44[a]	0.78±0.12[a]
天冬酰胺	249.20±0.18[a]	140.30±0.26[b]	70.76±0.22[d]	78.97±0.35[c]
必需氨基酸	433.84	267.02	236.81	265.01
非必需氨基酸	650.37	477.48	436.46	422.50
氨基酸总量	1084.21	744.50	673.27	687.51
必需氨基酸/非必需氨基酸	0.67	0.56	0.54	0.63
必需氨基酸/氨基酸总量	0.40	0.36	0.35	0.39

注: *为必需氨基酸; 以干样计。

2.4 氨基酸营养价值评价

2.4.1 氨基酸评分

AAS 根据 BANO 等[28]的方法, 是评价必需氨基酸满足人体营养需求的核心指标, AAS>1 表示该氨基酸含量可满足人体需求, AAS<1 则为限制性氨基酸, 数值越低限制作用越强。由表 5 可知, 野生刺笋的氨基酸评分整体表现最优, 除苯丙氨酸+酪氨酸、苏氨酸外, 其余必需氨基酸 AAS 值均大于 1, 表明野生刺笋的必需氨基酸组成与人体需求契合度较高, 其中赖氨酸 AAS 值达 2.69, 为 4 种竹笋所有指标中的最高值, 赖氨酸营养优势显著。4 种竹笋均存在限制性氨基酸, 苯丙氨酸+酪氨酸、苏氨酸为共有特征性限制性氨基酸, 且苏氨酸在 4 种竹笋中 AAS 均处于较低水平, 其中麻笋苏氨酸 AAS 为 0.57, 为所有检测指标中的最低值, 是麻笋的第一限制性氨基酸。毛竹笋、麻笋、甜笋的整体 AAS 值显著低于野生刺笋, 其中麻笋多项指标为 4 种中最低, 甜笋赖氨酸 AAS 仅 0.59, 为其最主要的限制性氨基酸; 毛竹笋缬氨酸 AAS 为 1.23, 为该品种表现最优的必需氨基酸, 也是 3 种栽培笋中缬氨酸营养的最优品种。综合来看, 4 种竹笋的 AAS 整体水平排序为: 野生刺笋>甜笋>毛竹笋>麻笋。

表 5 4 种竹笋的 AAS

Table 5 AAS of 4 kinds of bamboo shoots

氨基酸	野生刺笋	毛竹笋	麻笋	甜笋
异亮氨酸	1.45	0.98	0.92	1.09
亮氨酸	1.12	0.76	0.61	0.84
赖氨酸	2.69	0.96	0.74	0.59
缬氨酸	1.47	1.23	0.84	1.14
蛋氨酸+胱氨酸	1.17	0.79	1.12	1.00
苯丙氨酸+酪氨酸	0.89	0.72	0.75	0.75
苏氨酸	0.79	0.70	0.57	0.65

注: 竹笋中 18 种氨基酸不包括色氨酸, 故必需氨基酸评分不包含色氨酸的评分; 下同。

2.4.2 氨基酸化学评分

CS 是采用 FAO/WHO[29]推荐的方法, 用来测定评价待测蛋白质中某一必需氨基酸的相对含量(与其必需氨基

酸总量之比)与参考蛋白模式中相应必需氨基酸相对含量的接近程度。CS 值越高, 表明该氨基酸与鸡蛋蛋白质的契合度越高, 蛋白质营养价值越好, CS<1.0 的氨基酸为限制性氨基酸。由表 6 可知, 4 种竹笋的 7 种必需氨基酸中 CS 值在 0.46~2.11 之间。野生刺笋中, 异亮氨酸、赖氨酸和缬氨酸的 CS 值均大于 1.0, 最低的为苯丙氨酸+酪氨酸, 表明野生刺笋的主要限制性氨基酸为苯丙氨酸+酪氨酸, 赖氨酸含量相对充足。毛竹笋、麻笋、甜笋的所有必需氨基酸 CS 值均小于 1.0, 其中毛竹笋最低的为蛋氨酸+胱氨酸, 麻笋最低的为亮氨酸和苏氨酸, 甜笋最低的为赖氨酸。这表明 3 种竹笋的必需氨基酸组成与鸡蛋蛋白质的差异较大, 营养价值相对较低, 且不同品种的主要限制性氨基酸不同。CS 值排序与 AAS 值一致, 均为野生刺笋>甜笋>毛竹笋>麻笋, 进一步验证了野生刺笋的必需氨基酸营养价值在 4 种竹笋中最优, 其蛋白质组成更接近优质蛋白质的氨基酸模式。

表 6　4 种竹笋氨基酸 CS
Tabel 6　CS of amino acids in 4 kinds of bamboo shoots

氨基酸	野生刺笋	毛竹笋	麻笋	甜笋
异亮氨酸	1.07	0.73	0.68	0.80
亮氨酸	0.91	0.62	0.50	0.69
赖氨酸	2.11	0.76	0.58	0.46
缬氨酸	1.11	0.93	0.63	0.86
蛋氨酸+胱氨酸	0.72	0.49	0.69	0.62
苯丙氨酸+酪氨酸	0.62	0.50	0.53	0.53
苏氨酸	0.69	0.61	0.50	0.57

2.4.3　氨基酸比值系数和氨基酸比值系数分

氨基酸比值系数法是蛋白质营养价值评价常用的方法, 主要由 RC、SRC 两组指标进行分析[30]。该方法以氨基酸平衡理论为基础, 用于评价各种必需氨基酸偏离氨基酸模式的离散程度[31]。RC>1, 则样品中的必需氨基酸过剩, 否则为不足。由表 7 可知, 4 种竹笋的 RC 存在明显差异, 野生刺笋中的赖氨酸的 RC 最高, 苏氨酸的 RC 最低, 其余氨基酸的 RC 在 0.65~1.07 之间, 表明野生刺笋的赖氨酸含量过高, 苏氨酸含量不足, 导致其必需氨基酸组成不均衡。毛竹笋中的缬氨酸的 RC 最高, 苏氨酸的 RC 最低, 各氨基酸 RC 相对接近, 表明其必需氨基酸组成较均衡。麻笋中的蛋氨酸+胱氨酸的 RC 最高, 苏氨酸的 RC 值最低, 整体偏离程度较小。甜笋中的缬氨酸的 RC 最高, 赖氨酸的 RC 最低, 组成均衡性中等。

SRC 值越接近 100, 说明蛋白质营养价值越高[16]。4 个品种竹笋的 SRC 在 53.68~78.25 之间, 平均值为 70.82, 高于陈中爱等[14]研究 5 个品种竹笋的 SRC 平均值(64.11)。有研究表明 SRC≥70 时, 蛋白质营养价值较好[32]。SRC 排序为毛竹笋>麻笋>甜笋>野生刺笋。其中, 毛竹笋、麻笋、甜笋的 SRC 均≥70, 表明 3 种竹笋的必需氨基酸组成较均衡, 营养价值较好; 而野生刺笋的 SRC<70, 主要原因是其赖氨酸的 RC 过高, 苏氨酸的 RC 过低, 导致氨基酸组成不均衡, 进而降低了其整体营养价值。这一结果与 AAS、CS 的评价结果形成互补, 说明野生刺笋虽然必需氨基酸含量高, 与人体需求契合度高, 但组成不均衡; 而毛竹笋、麻笋、甜笋虽然氨基酸含量较低, 与优质蛋白质模式差异较大, 但组成相对均衡。综上, 虽然野生刺笋的必需氨基酸总量最高, 但是其氨基酸组成不及毛竹笋的氨基酸组成均衡。所以, 毛竹笋是本研究 4 种竹笋中营养价值最高的植物蛋白。

表 7　4 种竹笋的 RC 和 SRC
Table 7　RC of SRC in 4 kinds of bamboo shoots

氨基酸	野生刺笋	毛竹笋	麻笋	甜笋
异亮氨酸	1.06	1.11	1.16	1.25
亮氨酸	0.82	0.86	0.77	0.97
赖氨酸	1.96	1.09	0.94	0.68
缬氨酸	1.07	1.40	1.06	1.31
蛋氨酸+胱氨酸	0.85	0.90	1.42	1.15
苯丙氨酸+酪氨酸	0.65	0.82	0.95	0.86
苏氨酸	0.58	0.80	0.72	0.75
SRC	53.68	78.25	76.16	75.18

3　讨论与结论

本研究中 4 种竹笋的水分、灰分、蛋白质、脂肪、14 种矿物质元素、18 种氨基酸含量存在显著的种间差异, 这种差异主要来源于遗传因素和产地环境因素[33–34]。鲜笋经过蒸煮或浸泡 3 d 对其研究项目(除了氨基酸不做蒸煮和浸泡统计外)都有不同程度的损失。野生刺笋鲜笋的蛋白质、脂肪、K、Ca、Mg、P、Fe、Zn、Cu 含量均高于其他 3 种竹笋, 是一种高蛋白、高 Ca 高 K 高 Fe 蔬菜, 可作为补充 Ca、Fe、K 元素的来源。有害元素 As、Pb、Cd、Cr、Hg 的含量远低于 GB 2762—2022 的要求, 说明竹笋是安全的。氨基酸是构成蛋白质的基本单位, 其种类、含量及比例直接决定食物蛋白质的营养价值和生理功能[18]。4 种竹笋的氨基酸组成具有明显的品种特异性, 其营养价值各有优劣。野生刺笋的氨基酸总量、必需氨基酸含量显著高于其他 3 种竹笋, AAS、CS 值均为最高, 表明其蛋白质含量丰富、必需氨基酸供给能力强, 与人体需求和优质蛋白质模式的契合度高, 但其 SRC 较低(53.68), 主要由于赖氨酸过量、苏氨酸不足导致必需氨基酸组成不均衡, 若通过加工调整(如与苏氨酸含量高的食物搭配), 可进一步提升其营养价值。毛竹笋、麻笋、甜笋的氨基酸含量相对较低, 但三者的 SRC≥70, 必需氨基酸组成较均衡。在实际开发利用中, 可根据不同品种的氨基酸特征, 针对性地用于食品

加工、保健品开发等领域：野生刺笋可作为高蛋白食材，用于补充人体必需氨基酸；毛竹笋、麻笋、甜笋可通过与限制性氨基酸含量高的食材搭配，提升其蛋白质营养价值，实现竹笋资源的高效利用。

4 种竹笋胱氨酸含量较低且组间无显著差异，是其共性营养特征。其合成过程是否受到竹笋物种共有的遗传限制，导致其无法大量积累，这一共性特征是否与竹笋的进化适应性相关，值得进一步验证；天冬酰胺含量较高，是竹笋氨基酸组成的重要特征。天冬酰胺具有增强免疫力、调节代谢等生理功能[35]，这可能是竹笋具有一定保健价值的重要原因之一；毛竹笋、麻笋、甜笋作为人工种植品种，其氨基酸含量显著低于野生刺笋，除了遗传因素外，人工种植中的水肥管理(如氮素施加量、施肥时期)是否未匹配其氨基酸合成的需求，导致养分积累不足，这一问题的明确的可为人工种植竹笋的营养品质提升提供理论支撑。

本研究不仅揭示了 4 种竹笋品种间的营养差异，更引申出遗传、环境、生理、应用等多维度的科学问题。未来研究应重点关注以下方向：(1)通过分子生物学、环境调控、生理生化分析等手段，明确竹笋氨基酸积累的调控机制，为竹笋资源的保护、人工种植品质提升及差异化开发提供更精准的理论支撑；(2)开展竹笋氨基酸的生物利用率研究，为其在功能性食品中的应用提供理论基础；(3)研究不同加工方式对氨基酸营养保持的影响，建立科学的加工工艺。

参考文献

[1] ZHANG L, PENG X, WU X, *et al*. Characterization and decoding of volatile organic compounds in Moso bamboo shoots (*Phyllostachys edulis* L) at different growth stages: A combined analysis by HS-GC-IMS. HS-SPME-GC-MS, E-nose, and molecular docking [J]. Food Research Intemational, 2025, 221(P4): 117559.

[2] SEERAT A, ASLAM AM, RAFIQUE TM, *et al*. Interplay between phytohormones and sugar metabolism in *Dendrocalamus latiflorus* [J]. Plants, 2025, 14(3): 305.

[3] YONG H, HANG X, GUILIN Y, *et al*. Integrated metabolomic and transcriptomic analysis reveals the effect of artificial shading on reducing the bitter taste of bamboo shoots [J]. Horticulturae, 2022, 8(7): 594.

[4] HUANG X, ZHANG Y, HUANG N, *et al*. Lignification and gene expression pattern in postharvest moso bamboo shoots [J]. Forests, 2025, 16(1): 81.

[5] GOVAL KA, USHA T, KALITA M, *et al*. Traditition meets technology: An overview of femented bamboo shoots [J]. Advances in Bamboo Science, 2024, 7: 100078.

[6] 陈莉华, 高文昱, 王晓静, 等. 竹笋总多糖的提取及抗氧化活性研究[J]. 林产化学与工业, 2014, 34(5): 157–161.
CHEN LH , GAO WY, WANG XJ, *et al*. Extraction of total polysac charides from bamboo shoots and their antionxidative activities [J]. Chemical Industry and Forest Products, 2014, 34(5): 157–161.

[7] 李彬, 曾清苹, 曾小英, 等. 重庆 7 种笋用竹竹笋的食味品质与营养成分比较[J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(6): 31–35.
LI B, ZENG QP, ZENG XY, *et al*. Comparison of taste quality and nutritional componeents of seven bamboo shoots usde in Chongqiong [J]. World Bamboo and Rattan Newsletter, 2023, 21(6): 31–35.

[8] 百瑞华, 丁兴萃, 王树东. 竹笋生长期营养及安全品质的分析[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 281–283.
BAI RH, DING XC, WANG SD. Analysis of nutritional and safety quality of bamboo shoots during growth period [J]. Food Science, 2011, 32(5): 281–283.

[9] JANA KU, BHARDWAI KP, JEVARAM K, *et al*. Bamboo shoots: Comprehensive perspectives on food composition, nutritional value, and therapeutic potential [J]. Joumal of Food Composition and Analysis, 2025, 140: 107198.

[10] ISLAM AM, ISLAM MMSM, CHAKRABORTY D, *et al*. Health-promoting attributes of bamboo shoots: Nutritional and antionxidant studies in the Chattogram Hill Tracts, Bangladesh [J]. Food and Humannity, 2025, 5: 100832.

[11] 朱欢腾, 杨柳, 周侃侃, 等. 6 种主要食用竹笋的口感品质与营养成分比较[J]. 浙江林业科技, 2025, 45(3): 86–91.
ZHU HT, YANG L, ZHOU KK, *et al*. Comparison of sensory quality and nutritional components of six main edible bamboo [J]. Zhejiang Forestry Science and Technology, 2025, 45(3): 86–91.

[12] 王昕怡, 陈铭钰, 胡晨阳, 等. 竹笋食品品质评价指标及其提升技术研究进展[J]. 安徽农学铜报, 2023, 29(4): 128–131.
WANG XY, CHEN MY, HU CY, *et al*. Research progress on evaluation indicators and improvement techniques for the taste quality of bamboo shoots [J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2023, 29(4): 128–131.

[13] 徐森, 谷瑞, 陈双林, 等. 毛竹春笋营养、食味和基于重金属的安全品质的海拔效应[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 144–152.
XU S, GU R, CHEN SL, *et al*. The altitude effect of nutrition, taste, and heavy metal based safety quality of bamboo shoots in spring [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2021, 43(1): 144–152.

[14] 陈中爱, 耿阳阳, 黄珊, 等. 不同品种竹笋营养品质分析与综合评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 262–268.
CHEN ZAI, GENG YY, HUANG S, *et al*. Analysis and comprehensive evaluation of nutritional quality of bamboo shoots from different cultivars [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 262−268.

[15] 陈松河, 马丽娟, 丁振华, 等. 5 种牡竹属笋用竹竹笋营养成分之比较[J]. 竹子学报, 2018, 37(4): 4–8.
CHEN SH, MA LJ, DING ZH, *et al*. Comparison of nutritional components in bamboo shoots of five species of phyllostachys [J]. Bamboo Journal, 2018, 37(4): 4–8.

[16] 檀笑阳, 许畅, 高远, 等. 7 种苦味竹笋蛋白质营养品质差异分析[J]. 浙江林业科技, 2023, 43(4): 50–56.
TAN XY, XU C, GAO Y, *et al*. Analysis of nutritional quality differences in seven bitter bamboo shoots protein [J]. Zhejiang Forestry Science and Technology, 2023, 43(4): 50–56.

[17] 张佳佳, 白瑞华, 丁兴萃. 两种主要食用竹笋的营养及安全品质比较[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 18–23.
ZHANG JJ, BAI RH, DING XC. Comparison of nutrition and safety quality of two main edible bamboo shoots [J]. Food Research and Development, 2021, 42(8): 18–23.

[18] 杨月欣. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018.
YANG YX. Chinese food composition table [M]. Peking: Peking University Medical Press, 2018.

[19] WANG Y, CHEN J, WANG D, *et al*. A systematic review on the composition, storage, processing of bamboo shoots: Focusing the nutritional and functional benefits [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 71: 104015–104026.

[20] CHONGTHAM N, BISHT MS, HAORONGBAM S. Nutritional properties of bamboo shoots potential and prospects for utilization as a health food [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(3): 153–168.

[21] XIAN YP, HAI BJ, XIU XG, *et al*. Sceeening and evaluation of bamboo shoots: Comparing the content of trace elements from 100 species [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101071.

[22] CHONGTHAM N, BISHT MS, SANTOSH O, *et al*. Mineral elements in bamboo shoots and potential role in food fortification [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 95: 103662.

[23] 华东理工大学有机化学教研组. 有机化学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
Organic Chemistry Teaching and Research Group of East China University of Science and Technology. Organic chemistry [M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2013.

[24] 任春春, 贾玉龙, 娄义龙, 等. 贵州金佛山方竹笋营养及功能成分剖析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 214–221.
REN CC, JIA YL, LOU YL, *et al*. Analysis of nutrition and functional components of bamboo shoots from Jinfo Mountain, Guizhou [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 214–221.

[25] JI H, NI W, SHAO FJ. Comparison and assessment of nutritional composition in shoots of six bamboo species in Southeast China [J]. Advances in Bamboo Science, 2024, 7: 100087.

[26] 欧行奇, 李新华, 朱彬. 甘薯茎尖与常见叶菜类蔬菜氨基酸含量及组成的比较分析[J]. 氨基酸和生物资源, 2007, 29(3): 70–74.
OU XQ, LI XH, ZHU B. Comparative analysis of amino acid content and composition between stem tip of sweet potato and common leaf vegetables [J]. Amino Acids and Biological Resources, 2007, 29(3): 70–74.

[27] 焦扬, 李兴艳, 李彩霞, 等. 基于马铃薯全粉的代餐粉冲溶特性和蛋白质营养评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 34–40.
JIAO Y, LI XY, LI CX, *et al*. Evaluation of soluble characteristics and protein nutrition of potato meal replacement powder based on potato whole meal [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 34–40.

[28] BANO Z, RAJRATHNAM S. Pleurotus mushroom as a nutritious food [A]. In the tropical mushrooms biological nature and cultivation methods [C]. Hongkong: The Chinese University Press, 1982.

[29] FAO. Amino acid content of foods and biological data on proteins [Z].

[30] 李兴艳, 王炎, 张瑞霞, 等. 基于统计学和营养学的三种藻粉蛋白质营养价值评价与方法分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 322–329.
LI XY, WANG Y, ZHANG RX, *et al*. Nutritional value evaluation and method analysis of three algae powder proteins based on statistics and nutrition [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 322−329.

[31] 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 ST, WU K. Evaluation of protein nutritional value-Amino acid ratio coefficient method [J]. Journal of Nutrition, 1988, 10(2): 187–190.

[32] 王景会, 李铁纯, 回瑞华. 氨基酸比值系数分法评价大豆蛋白的营养价值[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 269–273.
WANG JH, LI TC, HUI RH. Evaluation of the nutritional value of soybean protein based on amino acid ratio partition method [J]. Food Science, 2018, 39(8): 269–273.

[33] 黄梅, 范可可, 储昊煜, 等. 竹笋营养成分与采收前后管理技术研究进展[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(6): 88–94, 105.
HUANG M, FAN KK, CHU HY, *et al*. Research progress on nutrient components in bamboo shoots and management technologies before and after harvest [J]. World Bamboo and Rattan, 2024, 22(6): 88–94, 105.

[34] 彭书蕾, 叶夏英, 曾清贤. 6 种常见竹笋营养成分及其影响因素研究进展[J]. 世界竹藤通讯, 2025, 23(2): 105–109, 121.
PENG SL, YE XY, ZENG QX. Research progress in nutritional components of six common bamboo shoots and their influencing fac tors [J]. World Bamboo and Rattan, 2025, 23(2): 105–109, 121.

[35] 陈明, 李娟, 张虹. 天冬酰胺的生理功能及在食品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 345–352.
CHEN M, LI J, ZHANG H. Research progress on the physiological function and spplication in food of asparagine [J]. Food Industry Science and, 2020, 42(3): 345–352.

(责任编辑: 韩晓红　安香玉)