

金佛山方竹不同出土高度和部位竹笋营养品质分析

秦 敏^{1,2}, 王晓芹³, 卞丽丽^{1,2}, 伍虹雨^{1,2}, 姚文静¹, 林树燕^{1*}

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学竹类研究所,
江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学生命科学学院, 江苏 南京 210037;
3. 山东省诸城市人民政府舜王街道农业农村服务中心, 山东 诸城 262200)

摘要:【目的】探明金佛山方竹(*Chimonobambusa utilis*)竹笋不同出土高度[(0,10]、(10,20]、(20,30]、(30,40] cm]及不同部位(上部、中部、下部)在营养品质上的差异,综合评定其营养价值,为金佛山方竹竹笋产品开发提供参考。【方法】利用液相色谱等方法测定竹笋营养品质指标,采用主成分分析和隶属函数法评价不同出土高度和部位金佛山方竹笋的综合营养品质。【结果】金佛山方竹笋不同出土高度的营养成分呈现出规律性变化,随着出土高度的增加,竹笋膳食纤维、粗脂肪、灰分、单宁、还原糖、果糖和葡萄糖含量逐渐升高,与之相反的是水分、粗蛋白、蔗糖、总酸和矿质元素含量总体逐渐降低,而总糖、黄酮含量呈先上升后下降的趋势,维生素 C 含量相对稳定;不同出土高度的方竹笋所含氨基酸种类较多,出土(0,10] cm 竹笋的总氨基酸含量和人体必需氨基酸含量均显著高于其他 3 个出土高度。不同部位金佛山方竹笋的营养成分存在差异,自下部至上部,灰分、单宁、总糖、还原糖、果糖、葡萄糖含量呈逐渐下降趋势,而水分、粗蛋白、黄酮、总酸和矿质元素含量总体逐渐上升,膳食纤维、蔗糖含量相对稳定。竹笋下部维生素 C 含量最高,竹笋上部粗脂肪含量最低,且总氨基酸和人体必需氨基酸含量显著高于中部和下部。【结论】随出土高度的增加和竹笋部位的下降,金佛山方竹笋综合营养品质逐渐降低。

关键词:金佛山方竹;竹笋出土高度;竹笋不同部位;营养品质

中图分类号:S795

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2024)06-0079-12



Nutritional quality analysis of *Chimonobambusa utilis* bamboo shoots at different heights and parts

QIN Min^{1,2}, WANG Xiaolin³, BIAN Lili^{1,2}, WU Hongyu^{1,2}, YAO Wenjing¹, LIN Shuyan^{1*}

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Bamboo Research Institute, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Life Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
3. Agricultural and Rural Service Centre, Shunwang Street, Zhucheng City People's Government, Shandong Province, Zhucheng 262200, China)

Abstract: 【Objective】The nutritional quality of *Chimonobambusa utilis* bamboo shoots at different heights ((0,10], (10,20], (20,30], (30,40] cm) and parts (upper, middle, lower) were analyzed. Understanding the nutritional variation rules and evaluating the nutritional value of *C. utilis* shoots at different heights and parts will provide a reference for the product development of bamboo shoots. 【Method】The content of each nutrient component was determined by liquid chromatography. Principal component analysis and the subordinate function method were used to comprehensively evaluate the nutritional quality of *C. utilis* bamboo shoots at different heights and parts. 【Result】There were differences in the nutritional composition of bamboo shoots at different heights in *C. utilis*. With increasing shoot height, reducing

收稿日期 Received: 2023-03-01

修回日期 Accepted: 2023-04-07

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD2200503);宜宾市重大攻关项目(智慧竹业关键技术与集成示范项目);贵州省特色林业产业科研项目(特林研 2020-17);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者:秦敏(mq178828@163.com),负责试验设计与论文初稿写作;王晓芹(xiaoqin-2009@163.com),负责试验与论文修改。

*通信作者:林树燕(lrx@njfu.com.cn),教授。

引文格式:秦敏,王晓芹,卞丽丽,等.金佛山方竹不同出土高度和部位竹笋营养品质分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(6):79-90.QIN M, WANG X Q, BIAN L L, et al. Nutritional quality analysis of *Chimonobambusa utilis* bamboo shoots at different heights and parts[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(6): 79-90. DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.202303001.

sugar, fructose, and glucose in the bamboo shoots gradually increased, whereas the contents of contents of water, crude protein, sucrose, and total acid decreased. The total sugar and flavonoid contents showed a trend of initially increasing and then decreasing. Vitamin C contents were stable. The contents of total amino acids and essential amino acids at 0–10 cm were significantly higher than those at the other three heights. In addition, there were significant differences in the nutritional composition of different parts of the bamboo shoots. From the lower part to the upper part of the shoots, the content of ash, tannins, total sugar, reducing sugar, fructose and glucose gradually decreased, while the content of water, crude protein, flavonoids, total acid and mineral elements generally increased. The contents of dietary fiber and sucrose were stable. Vitamin C content was the highest in the lower part of bamboo shoots. In the upper part of the bamboo shoots, the content of crude fat was the lowest and the content of total amino acids and essential amino acids in the upper part of bamboo shoots was significantly higher than that in the middle and lower parts.【Conclusion】The comprehensive nutritional quality of *C. utilis* bamboo shoots gradually decreased with increasing emergence height and decreasing bamboo shoot position.

Keywords: *Chimonobambusa utilis*; bamboo shoot height; bamboo shoot different parts; nutritional quality

金佛山方竹(*Chimonobambusa utilis*)属竹亚科(Bambusoideae)寒竹属(*Chimonobambusa*),复轴混生型小径竹,主要分布在海拔1 200~2 200 m 的重庆南川区和贵州省桐梓县、正安县、绥阳县以及云南省镇雄县等地^[1],为我国西南地区特有竹种。金佛山方竹竹秆节间呈圆筒形或略为四棱形,其秆形优美,竹笋质嫩肉厚,口感鲜美,富含蛋白质、膳食纤维、矿物质、氨基酸及维生素、黄酮、多酚、植物甾醇等多种活性物质,营养丰富,被誉为“竹笋之冠”^[2-3],是优质的观赏及笋用竹种,具有重要的经济、生态和社会效益。金佛山方竹通常在中秋前后发笋,可弥补竹笋淡季空缺^[4]。

竹笋的天然营养价值受到广泛关注,高品质竹笋培育逐渐成为今后研究与发展的热门方向^[5]。当前对竹笋营养品质的研究主要集中在遗传因素、环境条件、丰产栽培、品质改良和竹笋保鲜等方面^[6-12],有少量研究发现筴竹(*Chimonobambusa tumidissinoda*)、毛竹(*Phyllostachys edulis*)、版纳甜龙竹(*Dendrocalamus hamiltonii*)和雷竹(*Phyllostachys praecox*)等竹笋在不同出土高度或部位营养品质存在差异^[13-16]。然而,关于金佛山方竹笋品质与其出土高度及部位是否有相关性的研究鲜见报道。本研究以金佛山方竹不同出土高度、不同部位的竹笋为材料,分析其基本营养成分、矿质元素及氨基酸组分间差异,采用主成分分析和隶属函数法对竹笋的各个营养指标进行营养品质综合评价,探索金佛山方竹笋生长过程中营养成分的动态变化规律,明确金佛山方竹笋品质的最佳出土高度和部位,旨在为金佛山方竹笋资源的合理开发和高值化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2021年9月下旬,在贵州省遵义市桐梓县选择立地条件、经营措施和经营水平基本一致的金佛山方竹林(106°59′19″E,28°28′58″N)。参考当地市场收购竹笋地径和长度标准,采集出土高度分别为(0,10]、(10,20]、(20,30]、(30,40] cm 健康、无病虫害、无机械损伤的竹笋,依次编号为H1、H2、H3、H4;另采集出土高度为(20,30] cm 的新鲜竹笋,快速去除笋壳,分别采集竹笋的上部、中部、下部,迅速投入干冰中保存,并委托南京因特生物科技有限公司进行营养成分检测。

1.2 试验方法

总糖含量采用酸解苯酚法测定;果糖、蔗糖含量采用间苯二酚比色法测定;葡萄糖含量采用酶试剂比色法测定;还原糖含量采用DNS比色法测定;总酸含量采用酸碱滴定法测定;膳食纤维含量采用酶解法测定;单宁、维生素C、黄酮含量采用分光光度法测定;粗脂肪含量采用索氏抽提法测定;粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定;灰分含量采用质量法测定;全磷含量采用钼锑抗比色法测定;全钾含量采用火焰光度计法测定;Ca等矿质元素含量采用ICP-aes/ms法测定;20种游离氨基酸组分采用液相色谱法测定^[3]。所有分析测定均为3次生物学重复。各营养物质含量均以干物质计。

1.3 数据处理

为消除不同指标量纲和数量级的差异^[17],进行主成分分析前,依据隶属函数对原始数据进行标准化处理,正相关指标依据公式(1),负相关指标依据公式(2),主成分得分 F_j 依据公式(3),综合分值 D_n 的计算以相应主成分的贡献率 E_j 为权重,通

过公式(4)得到。

$$U_i = (X_i - X_{i,\min}) / (X_{i,\max} - X_{i,\min}); \tag{1}$$

$$U_i = 1 - (X_i - X_{i,\min}) / (X_{i,\max} - X_{i,\min}); \tag{2}$$

$$F_j = \sum_{i=1}^n K_{ji} \times U_i; \tag{3}$$

$$D_n = \sum_{j=1}^n F_j \times E_j。 \tag{4}$$

式中: X_i 为第 i 个指标的原始测定结果, $i=1,2,\cdots,n$; $X_{i,\min}$ 、 $X_{i,\max}$ 分别为第 i 个综合指标的最小值与最大值; U_i 为第 i 个指标的原始数据经标准化处理后的隶属函数值; K_{ji} 为第 j 个主成分中第 i 个指标对应的特征向量; F_j 为第 j 个主成分得分; E_j 为第 j 个

主成分的贡献率; D_n 为主成分法得到的竹笋品质综合分值。

使用 Excel 2021 统计数据,SPSS 26.0 软件进行方差分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同出土高度金佛山方竹笋营养品质差异

2.1.1 基本营养成分

不同出土高度金佛山方竹笋基本营养成分含量见表 1。

表 1 金佛山方竹笋不同出土高度基本营养成分

营养成分 nutrient content	H1	H2	H3	H4
含水率/% moisture content	91.51±0.09 a	91.06±0.05 b	90.43±0.06 c	90.00±0.03 d
灰分质量分数/% ash content	10.74±0.58 b	11.89±0.71 ab	13.52±2.69 ab	14.77±0.80 a
粗蛋白质量分数/% crude protein content	5.92±0.21 a	4.59±1.81 b	4.17±1.45 b	4.08±0.90 b
粗脂肪质量分数/% crude fat content	0.42±0.11 b	0.48±0.02 b	0.78±0.05 a	0.88±0.04 a
膳食纤维质量分数/% dietary fiber content	23.64±2.72 c	25.29±0.30 bc	27.52±2.27 ab	30.91±2.05 a
维生素 C 含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) vitamin C content	15.21±3.70 a	18.72±5.41 a	19.37±2.75 a	17.05±3.48 a
黄酮含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) flavone content	70.00±3.25 c	179.87±8.76 a	170.83±7.82 a	95.18±5.76 b
单宁含量/(mg·g ⁻¹) tannin content	5.73±0.02 d	8.14±0.03 c	8.77±0.06 b	11.09±0.03 a
总糖含量/(mg·g ⁻¹) total sugar content	437.93±15.95 d	661.05±23.33 c	1 020.59±66.02 a	844.26±39.20 b
还原糖含量/(mg·g ⁻¹) reducing sugar content	31.65±0.28 c	43.35±0.27 b	48.56±0.58 ab	54.48±6.51 a
果糖含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) fructose content	2.55±0.15 d	3.81±0.25 c	5.77±0.06 b	8.64±0.25 a
葡萄糖含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) glucose content	2.85±0.05 d	3.75±0.40 c	5.79±0.12 b	8.71±0.21 a
蔗糖含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) sucrose content	5.41±0.32 a	3.61±0.08 b	2.69±0.10 c	1.66±0.30 d
总酸浓度/(×10 ⁻² mmol·g ⁻¹) total acid content	43.37±40.03 a	21.87±2.08 b	19.81±1.08 b	17.76±2.32 b

注:所有数据以平均值±标准差表示,同行不同小写字母表示不同出土高度间差异显著($P < 0.05$)。H1. (0,10] cm;H2. (10,20] cm; H3. (20,30] cm;H4. (30,40] cm。下同。All data are expressed as mean ± standard deviation, and different lowercase letters indicate significant differences in the same row among unearthed heights ($P < 0.05$). H1. (0,10] cm;(10,20] cm; H3. (20,30] cm;H4. (30,40] cm. The same below.

随出土高度的增加,金佛山方竹笋的灰分、粗脂肪、单宁、膳食纤维、还原糖、果糖、葡萄糖含量均升高,而水分、粗蛋白、蔗糖、总酸含量均降低;黄酮、维生素 C、总糖等含量呈现先升高后降低的趋势,其中,黄酮含量在 H2 时最大,与 H3 差异不显著,而维生素、总糖含量则在 H3 时最大。

金佛山方竹笋水分、单宁、总糖、果糖、葡萄糖、

蔗糖含量在不同出土高度间差异显著;还原糖含量在 H2 与 H3、H3 与 H4 对比组间无显著差异;粗脂肪含量在 H1 与 H2、H3 与 H4 对比组间无显著差异;总酸摩尔浓度在 H1 与 H2、H3、H4 间有显著差异,而在 H2、H3、H4 间差异不显著;黄酮含量在 H2 与 H3 间无显著差异,维生素 C 含量在 4 个出土高度间无显著差异。

2.1.2 矿质元素含量

金佛山方竹笋常量元素中,K 含量远高于 P、Mg、Ca,分别是 P、Mg、Ca 的 8.0、11.5、9.8 倍;K 元素含量随着竹笋高度增加表现为“下降—升高—下降”趋势,在 H1、H2、H3 之间无显著性差异,但

在 H1、H2、H3 中的含量显著高于 H4;P 含量呈降低趋势,在不同出土高度竹笋间无显著性差异;Mg 含量由高至低依次为 H3>H4>H1>H2,各出土高度间均有显著性差异;Ca 含量随出土高度增加不断下降,且不同出土高度间存在显著差异(表 2)。

表 2 金佛山方竹笋不同出土高度矿质元素含量
Table 2 Mineral content in *C. utilis* bamboo shoots of different heights 单位:×10⁻² mg/g

矿质元素 mineral element	H1	H2	H3	H4
K	6 026.25±194.44 a	5 859.83±53.04 a	6 005.49±250.02 a	5 223.66±403.32 b
P	748.08±50.77 a	759.17±102.85 a	729.92±49.11 a	649.62±48.55 a
Mg	411.80±8.74 c	325.98±15.77 d	709.32±52.14 a	570.20±43.17 b
Ca	877.85±48.23 a	699.82±41.11 b	506.67±53.99 c	283.77±80.79 d
Fe	33.47±7.10 b	79.14±11.85 a	14.53±8.00 c	8.62±2.00 c
Zn	23.76±0.65 a	21.55±3.03 a	16.07±1.17 b	15.91±2.46 b
Mn	23.24±1.17 a	11.53±1.18 b	10.26±0.42 bc	8.74±1.35 c
Cu	1.71±0.40 b	4.88±1.10 a	4.70±0.53 a	4.53±0.18 a
Se	0.077±0.004 c	0.126±0.002 b	0.179±0.008 a	0.168±0.006 a

金佛山方竹笋微量元素含量在 H1、H2 时由高至低依次是 Fe>Zn>Mn>Cu>Se;在 H3 时依次为 Zn>Fe>Mn>Cu>Se;在 H4 时依次为 Zn>Mn>Fe>Cu>Se。Fe 在 H2 时含量最高,分别为 H1 的 2.4 倍、H3 的 5.5 倍、H4 的 9.2 倍,H3 与 H4 间无显著性差异;Zn 含量在 H1 与 H2、H3 与 H4 对比组间无显著性差异;Mn 含量在 H1 时最高,而在 H4 时最低;Cu 含量在 H1 时最低,在 H2、H3、H4 出土高度上无显著性差异;Se 含量表现为 H3>H4>H2>H1,在 H3 与 H4 间无显著差异。

2.1.3 氨基酸含量

金佛山方竹笋中共检测出 17 种氨基酸,其中包括 7 种人体必需氨基酸、10 种非必需氨基酸。17 种氨基酸中丝氨酸含量最高,在 H1 时最大,达 2.89 mg/g;甲硫氨酸含量最少,在 H1 时较高,也仅 0.13 mg/g;总氨基酸(TAA)含量和人体必需氨基酸含量(EAA)均随出土高度增加逐渐下降,在 H1 时最高,在 H2、H3、H4 间无显著差异;4 个出土高度竹笋的 EAA 在 TAA 中占比均低于 30%,不同出土高度间无显著差异(表 3)。

表 3 金佛山方竹笋不同出土高度氨基酸含量
Table 3 Amino acid content in *C. utilis* bamboo shoots of different heights 单位:×10⁻² mg/g

氨基酸种类 amino acid type	H1	H2	H3	H4
苯丙氨酸▲phenylalanine	72.59±5.12 a	45.22±1.46 b	34.87±0.48 b	41.88±9.21 b
赖氨酸▲lysine	34.55±2.04 a	25.46±1.18 b	22.02±0.64 c	20.94±1.19 c
苏氨酸▲threonine	115.32±7.27 a	74.31±1.37 b	74.53±0.70 b	54.52±7.14 c
异亮氨酸▲isoleucine	48.66±5.87 a	28.63±2.27 b	25.44±0.63 b	26.30±4.60 b
亮氨酸▲leucine	59.23±7.84 a	32.61±2.73 b	30.05±0.59 b	27.69±6.47 b
缬氨酸▲valine	107.57±17.24 a	65.57±3.50 b	63.10±2.15 b	55.91±11.14 b
色氨酸▲tryptophan	43.91±5.36 a	33.27±0.74 b	28.33±2.21 b	25.01±4.63 b
精氨酸 arginine	84.26±13.92 a	50.16±4.19 b	45.47±3.92 b	40.89±8.76 b
组氨酸 histidine	279.75±21.56 a	169.14±6.77 b	171.08±7.04 b	142.89±24.98 b
甲硫氨酸 methionine	13.31±2.63 a	7.49±0.58 b	6.61±1.26 b	4.47±0.54 b
丝氨酸 serine	289.34±0.63 a	183.06±6.06 b	176.50±0.85 b	124.84±8.44 c
脯氨酸 proline	108.86±6.78 a	70.34±2.62 b	58.53±1.34 c	30.55±5.54 d
甘氨酸 glycine	22.14±0.15 a	16.26±0.43 b	17.01±1.56 b	13.58±1.35 c
丙氨酸 alanine	86.76±3.60 a	67.81±2.05 b	72.89±7.82 ab	60.45±9.51 b
天冬氨酸 aspartic acid	196.61±21.67 a	153.09±5.28 ab	113.08±3.46 bc	77.23±42.09 c
谷氨酸 glutamic acid	65.69±10.24 a	63.79±3.72 a	60.79±9.07 a	75.91±31.02 a
酪氨酸 tyrosine	149.83±27.65 a	73.12±2.23 b	63.01±1.98 b	73.05±20.30 b
总氨基酸 TAA	1 778.38±50.08 a	1 159.34±31.86 b	1 063.31±26.05 b	896.14±51.85 b
必需氨基酸 EAA	481.84±7.25 a	305.08±8.18 b	278.35±3.29 b	252.25±7.62 b
EAA 占 TAA 比例/% EAA to TAA ratio	27.06±0.56 a	26.32±0.14 a	26.18±0.51 a	28.25±2.27 a

注:▲表示该氨基酸为人体必需氨基酸。下同。▲ indicates that the amino acid is an essential amino acid. The same below.

竹笋的口感及鲜美程度受不同种类的氨基酸含量影响,甜味氨基酸包括苏氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸,苦味类氨基酸包括缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸,鲜味类氨基酸包括天冬氨酸、谷氨酸,芳香味类氨基酸包括酪氨酸、苯丙氨酸。由表 4 可知,各出土高度的方竹笋所含呈味氨基酸含量由高到低的顺序均依次为甜

味类>苦味类>鲜味类>芳香味类。不同出土高度时,鲜味类和甜味氨基酸含量随出土高度增加逐渐减少,二者占 TAA 比例在 4 个高度间无显著差异;芳香味类和苦味类氨基酸随出土高度增加表现为先下降后上升,二者占 TAA 比例在 H1 与 H4, H2 与 H3 对比组间无显著差异。

表 4 金佛山方竹笋不同出土高度呈味氨基酸含量
Table 4 Flavorful amino acid content in *C. utilis* bamboo shoots of different heights

出土高度 excavated height	鲜味 umami		甜味 sweet		芳香味 aromatic		苦味 bitter	
	含量/ ($\times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	占 TAA 比例/% proportion of TAA	含量/ ($\times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	占 TAA 比例/% proportion of TAA	含量/ ($\times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	占 TAA 比例/% proportion of TAA	含量/ ($\times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	占 TAA 比例/% proportion of TAA
	content		content		content		content	
H1	262.30±29.48 a	14.73±0.41 a	622.42±16.87 a	35.11±1.98 a	222.42±32.75 a	12.46±0.78 a	437.88±63.59 a	24.54±1.51 a
H2	216.88±8.97 ab	18.70±0.31 a	411.79±4.21 b	35.53±0.93 a	118.35±2.75 b	10.21±0.10 b	245.16±10.81 b	21.14±0.38 ab
H3	173.87±10.47 ab	16.35±0.72 a	399.46±9.52 b	37.57±0.30 a	97.88±1.88 c	9.21±0.18 b	216.47±4.52 b	20.36±0.11 b
H4	153.14±3.10 b	16.58±5.08 a	283.94±15.94 c	32.17±4.72 a	114.94±28.95 b	12.74±1.83 a	224.83±50.10 b	24.99±2.86 a

2.1.4 不同出土高度竹笋营养品质综合评价
不同出土高度的金佛山方竹笋营养组分存在较大差异,导致难以准确反映其营养品质的优劣,因此本研究对金佛山方竹笋的 23 个营养品质指标进行主成分分析,以特征值 $>1^{[18]}$ 为主成分的判定要求,结果见表 5。由表 5 可知,共提取出 3 个主

成分,累计方差贡献率达 100%。这 3 个主成分综合了 4 个出土高度竹笋的 23 个营养品质指标的大部分信息,可利用这 3 个主成分来代替 23 个营养指标对 4 个不同出土高度方竹笋品质进行综合评价。

表 5 金佛山方竹笋不同出土高度营养品质指标主成分的特征向量和载荷矩阵
Table 5 Principal component eigenvectors and loading matrix in *C. utilis* bamboo shoots of different heights

品质指标 quality index	主成分 1 PC 1		主成分 2 PC 2		主成分 3 PC 3	
	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix
水分 moisture	-0.966	-0.219	-0.235	-0.092	-0.110	-0.064
维生素 C vitamin C	-0.620	-0.141	0.784	0.305	-0.032	-0.019
黄酮 flavone	-0.578	-0.131	0.801	0.312	0.153	0.089
总酸 total acid	0.741	0.168	0.632	0.246	0.226	0.132
单宁 tannin	-0.122	-0.028	-0.828	-0.322	0.547	0.319
膳食纤维 dietary fiber	-0.530	-0.120	0.148	0.058	0.835	0.487
粗蛋白 crude protein	0.977	0.222	-0.207	-0.080	-0.049	-0.029
粗脂肪 crude fat	0.369	0.084	-0.915	-0.356	0.163	0.095
总糖 total sugar	-0.886	-0.201	0.263	0.102	-0.382	-0.223
还原糖 reducing sugar	-0.997	-0.226	-0.056	-0.022	0.058	0.034
果糖 fructose	-0.918	-0.208	-0.395	-0.154	-0.023	-0.014
葡萄糖 glucose	-0.896	-0.203	-0.442	-0.172	-0.045	-0.026
蔗糖 sucrose	0.995	0.226	0.089	0.035	-0.042	-0.024
磷 P	0.703	0.159	0.711	0.277	-0.004	-0.002
钾 K	0.662	0.150	0.634	0.247	-0.401	-0.234
镁 Mg	-0.626	-0.142	-0.063	-0.024	-0.777	-0.453
钙 Ca	0.960	0.218	0.277	0.108	0.028	0.016
铜 Cu	-0.849	-0.193	0.462	0.180	0.255	0.149
铁 Fe	0.415	0.094	0.584	0.227	0.697	0.407
锰 Mn	0.957	0.217	-0.233	-0.091	-0.171	-0.100
锌 Zn	0.946	0.215	0.071	0.028	0.316	0.184
硒 Se	-0.962	-0.218	0.157	0.061	-0.222	-0.130

表 5(续)

品质指标 quality index	主成分 1 PC 1		主成分 2 PC 2		主成分 3 PC 3	
	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix
鲜味氨基酸 umami amino acid	0.993	0.225	0.082	0.032	0.090	0.053
甜味氨基酸 sweet amino acid	0.971	0.220	0.024	0.010	-0.239	-0.140
芳香味氨基酸 aromatic amino acid	0.904	0.205	-0.423	-0.164	-0.07	-0.041
苦味氨基酸 bitter amino acid	-0.929	-0.211	0.351	0.136	0.120	0.070
必需氨基酸 EAA	0.967	0.219	-0.205	-0.080	-0.149	-0.087
总氨基酸 TAA	0.979	0.222	-0.121	-0.047	-0.162	-0.095
EAA 占 TAA 比例 EAA to TAA ratio	-0.267	-0.061	-0.941	-0.366	0.208	0.121
特征值 eigenvalue	19.454		6.608		2.938	
方差贡献率/% variance contribution rate	67.082		22.786		10.132	
累计方差贡献率/% cumulative variance contribution rate	67.082		89.868		100.000	

由表 5 可知,第 1 主成分方差贡献率为 67.082%,主要代表为总酸、粗蛋白、蔗糖、Mn、Zn、鲜味、甜味和芳香味类氨基酸,反映竹笋口感;第 2 主成分方差贡献率为 22.786%,主要代表为维生素 C、黄酮、P、K 和 Cu,反映竹笋内在品质;第 3 主成分方差贡献率为 10.132%,主要代表为单宁、Fe 和膳食纤维。

不同出土高度金佛山方竹笋的综合评价值(D_n)反映了竹笋营养品质优劣程度,综合分值越高,表明品质越好,结果见表 6。根据 D_n 值对 4 个不同出土高度方竹笋营养品质进行优劣排序,顺序为 H1>H2>H3>H4。

表 6 金佛山方竹笋不同出土高度综合评价值及排名

Table 6 Comprehensive evaluation value and ranking in *C. utilis* bamboo shoots of different heights

出土高度 excavated height	主成分 1 得分 PC 1 score	主成分 2 得分 PC 2 score	主成分 3 得分 PC 3 score	D_n	排序 rank
H1	5.921	-1.489	-0.575	3.574	1
H2	0.599	2.403	1.997	1.152	2
H3	-2.340	1.932	-2.031	-1.336	3
H4	-4.179	-2.846	0.609	-3.390	4

2.2 不同部位金佛山方竹笋营养品质差异

2.2.1 基本营养成分

竹笋不同部位各营养成分含量见表 7。

表 7 金佛山方竹笋不同部位基本营养成分含量

Table 7 Basic nutrient content in *C. utilis* bamboo shoots of different parts

指标 index	上部 upper part	中部 middle part	下部 lower part	指标 index	上部 upper part	中部 middle part	下部 lower part
含水率/% moisture content	92.17±0.02 a	91.15±0.11 b	90.68±0.10 c	单宁含量/(mg·g ⁻¹) tannin	4.71±0.07 c	7.86±0.14 b	10.81±0.10 a
灰分质量分数/% ash content	8.33±2.00 c	10.94±2.27 b	12.94±2.32 a	总糖含量/(mg·g ⁻¹) total sugar	551.11±5.09 c	883.04±17.09 b	1457.79±13.83 a
粗蛋白质量分数/% crude protein content	4.91±0.47 a	3.23±1.36 b	2.85±0.86 b	还原糖含量/(mg·g ⁻¹) reducing sugar content	21.00±0.38 c	42.91±0.90 b	69.30±0.23 a
粗脂肪质量分数/% crude fat content	0.72±0.02 b	0.75±0.05 ab	0.83±0.04 a	果糖含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) fructose content	2.08±0.14 c	7.03±0.24 b	12.13±0.34 a
膳食纤维质量分数/% dietary fiber content	26.99±3.77 a	27.02±1.69 a	28.89±3.05 a	葡萄糖含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) glucose content	2.07±0.02 c	6.52±0.03 b	11.79±0.49 a
维生素 C 含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) vitamin C content	19.60±2.43 ab	17.05±1.20 b	23.93±1.60 a	蔗糖含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) sucrose content	1.41±0.22 a	1.16±0.24 a	1.40±0.07 a
黄酮含量/(×10 ⁻² mg·g ⁻¹) flavone content	261.70±44.08 a	230.77±31.94 a	136.08±20.70 b	总酸浓度/(×10 ⁻² mmol·g ⁻¹) total acid content	23.02±2.96 a	16.38±0.61 b	16.69±0.69 b

基本营养成分含量测定结果表明,金佛山方竹笋 3 个部位的含水率均在 90% 以上;其中,上部含水率最高,达 92.17%,3 个部位具有显著性差异;3 个部位膳食纤维和蔗糖含量无明显差异,膳食纤维以下部竹笋含量最高。粗脂肪质量分数均较低,以下部含量最高;笋下部维生素 C 含量最高,高于上部和中部;黄酮在上部和中部的含量无显著差异,均显著高于下部;总糖含量从下至上依次减少,下部含量最高,为 1 457.79 mg/g,分别是上、中部的 2.6、1.7 倍;单宁、还原糖、果糖和葡萄糖含量从下部至上部逐渐降低,各部位存在显著性差异;总酸摩尔浓度在上部最高,为 0.23 mmol/g,与中部、下部有显著差异。

2.2.2 矿质元素含量

不同部位金佛山方竹笋矿质元素含量见表 8。由表 8 可知,金佛山方竹笋不同部位中 K、Ca 常量元素含量均表现为上部>中部>下部,Mg 元素则表现为中部>下部>上部。K 元素含量范围为 37.95~63.18 mg/g,各部位具有显著性差异;P 元素含量在上部和中部无显著差异,与下部差异显著;Mg 元素含量在中部最高,为 6.64 mg/g,分别是上部和下部的 2.1 倍和 1.3 倍;Ca 元素在上部的含量是中部和下部的 2.4 和 4.5 倍。

表 8 金佛山方竹笋不同部位矿质元素含量

Table 8 Mineral content in <i>C. utilis</i> bamboo shoots of different parts				单位:×10 ⁻² mg/g
矿质元素 mineral element	上部 upper part	中部 middle part	下部 lower part	
K	6 318.49±218.58 a	5 022.61±203.04 b	3 795.45±95.54 c	
P	674.66±42.65 a	734.72±29.35 a	534.15±19.52 b	
Mg	319.18±16.65 c	663.62±55.03 a	513.63±31.30 b	
Ca	917.89±76.74 a	384.05±92.80 b	204.76±68.07 b	
Fe	7.26±3.25 b	12.14±2.60 b	33.77±7.68 a	
Zn	21.59±1.81 a	14.04±1.48 b	12.13±2.25 b	
Mn	40.48±4.10 a	8.96±0.38 b	4.46±0.12 b	
Cu	6.42±1.03 a	2.84±0.70 b	5.44±2.00 a	
Se	0.148±0.073 a	0.083±0.021 b	0.153±0.024 a	

Fe 元素从竹笋下部至上部含量逐渐降低,上、中部显著低于下部;Zn 和 Mn 从下至上依次增加,上部与中、下部有显著差异,中部与下部之间无显著差异,尤其 Mn 元素上部与中、下部含量差异较大,上部分别是中部、下部的 4.5、9.1 倍。Cu 和 Se 元素从下至上表现为先降低后增加,上、下部显著高于中部。

2.2.3 氨基酸含量

不同部位金佛山方竹笋氨基酸含量见表 9。

表 9 金佛山方竹笋不同部位氨基酸含量

Table 9 Amino acid content in <i>C. utilis</i> bamboo shoots of different parts								单位:×10 ⁻² mg/g
氨基酸种类 amino acid type	上部 upper part	中部 middle part	下部 lower part	氨基酸种类 amino acid type	上部 upper part	中部 middle part	下部 lower part	
苯丙氨酸▲ phenylalanine	46.28±4.02 a	23.53±1.71 b	21.69±0.58 b	丝氨酸 serine	227.33±10.82 a	144.53±9.85 b	120.17±13.07 b	
赖氨酸▲ lysine	32.82±1.11 c	21.21±0.49 b	18.45±0.51 a	脯氨酸 proline	60.26±3.52 a	32.69±4.12 b	19.18±1.58 c	
苏氨酸▲ threonine	127.02±14.02 a	56.70±5.34 b	37.69±1.95 b	甘氨酸 glycine	21.34±2.94 a	11.49±2.79 b	9.17±0.89 b	
异亮氨酸▲ isoleucine	56.76±4.67 a	31.35±2.70 b	25.18±0.52 b	丙氨酸 alanine	85.79±8.90 a	48.71±3.23 b	36.20±2.97 b	
亮氨酸▲ leucine	64.14±5.64 a	29.76±3.05 b	22.13±0.42 b	天冬氨酸 aspartic acid	174.67±11.19 a	94.80±8.34 b	62.52±1.65 c	
缬氨酸▲ valine	164.82±16.87 a	81.51±5.31 b	53.01±2.81 c	谷氨酸 glutamic acid	60.82±7.67 b	79.67±6.52 a	60.79±1.75 b	
色氨酸▲ tryptophan	30.11±1.93 a	16.52±2.30 b	12.93±0.52 b	酪氨酸 tyrosine	118.01±12.33 a	51.20±1.82 b	56.40±1.98 b	
精氨酸 arginine	71.85±7.35 a	22.63±1.43 b	20.19±2.16 b	总氨基酸 TAA	1 715.09±91.88 a	943.46±63.64 b	733.94±25.16 c	
组氨酸 histidine	363.98±10.92 a	192.94±7.83 b	153.93±7.00 c	必需氨基酸 EAA	521.95±48.06 a	260.59±20.73 b	191.09±6.81 b	
甲硫氨酸 methionine	9.08±0.74 a	4.21±0.35 b	4.31±0.23 b	EAA 占 TAA 比例/% EAA to TAA ratio	30.40±1.41 a	27.61±0.63 b	26.04±0.19 b	

由表 9 可知,金佛山方竹笋各部位均检测出 17 种氨基酸,组氨酸、丝氨酸含量较高,而甘氨酸、甲硫氨酸含量较低。各种氨基酸含量在竹笋的不同部位有较大差异,除了谷氨酸之外,其他 16 种氨基酸含量从笋下部至上部逐渐增高,笋下部至笋中部变幅较小,笋中部至笋上部变幅较大;竹笋上部的 TAA 和 EAA 含量分别为 17.15、5.22 mg/g,分别是竹笋中部的 1.8 和 2.0 倍,是竹笋下部的 2.3 和 2.7 倍;竹笋上部 EAA 在 TAA 中占比高于中部和下部,达 30.40%。

在金佛山方竹笋同一部位中,甜味氨基酸表现

较为突出,占总氨基酸含量 30% 以上,4 类呈味氨基酸含量由高到低的顺序依次为甜味类>苦味类>鲜味类>芳香味类。不同部位中,鲜味类、甜味类、苦味类氨基酸含量从下部至上部逐渐增加,各部位差异显著;芳香味类氨基酸含量自下至上表现为先降低后增加,上部显著高于中、下部,中部与下部无显著差异;鲜味类和甜味类氨基酸在总氨基酸中占比自下至上表现为先上升后下降,中部占比最高;芳香类和苦味类氨基酸占比则表现为先下降后上升,芳香类氨基酸在下部占比最高,为 10.64%,而苦味类氨基酸占比在上部最高,为 26.21%(表 10)。

表 10 金佛山方竹笋不同部位呈味氨基酸含量比较

Table 10 Flavorful amino acid content in *C. utilis* bamboo shoots of different parts

部位 part	鲜味 umami		甜味 sweet		芳香味 aromatic		苦味 bitter	
	含量/ ($\times 10^{-2}$ mg·g ⁻¹)	占 TAA 比例/% proportion of TAA	含量/ ($\times 10^{-2}$ mg·g ⁻¹)	占 TAA 比例/% proportion of TAA	含量/ ($\times 10^{-2}$ mg·g ⁻¹)	占 TAA 比例/% proportion of TAA	含量/ ($\times 10^{-2}$ mg·g ⁻¹)	占 TAA 比例/% proportion of TAA
	content		content		content		content	
上部 upper	235.49±18.85 a	13.75±1.14 b	521.74±35.27 a	30.41±0.62 a	164.29±16.34 a	9.57±0.50 b	450.02±43.51 a	26.21±1.29 a
中部 middle	174.47±14.69 b	18.48±0.34 a	294.11±24.11 b	31.16±0.52 a	74.73±3.44 b	7.93±0.28 c	217.36±14.41 b	23.04±0.55 b
下部 lower	123.31±0.63 c	16.81±0.56 a	222.41±14.24 c	30.28±0.92 a	78.09±2.56 b	10.64±0.13 a	178.42±5.93 c	24.31±0.05 b

2.2.4 不同部位竹笋营养品质综合评价

不同部位竹笋营养成分综合评价见表 11。

表 11 金佛山竹笋不同部位营养品质指标主成分的特征向量和载荷矩阵

Table 11 Principal component eigenvectors and loading matrix in *C. utilis* bamboo shoots

品质指标 quality index	主成分 1 PC 1		主成分 2 PC 2		品质指标 quality index	主成分 1 PC 1		主成分 2 PC 2	
	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix		特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix	特征向量 feature vector	载荷矩阵 load matrix
水分 moisture	-0.908	-0.199	0.418	0.147	Fe	-0.842	-0.184	0.540	0.189
维生素 Cvitamin C	-0.437	-0.096	0.899	0.315	Mn	0.982	0.215	0.187	0.066
黄酮 flavone	0.875	0.192	-0.484	-0.170	Zn	0.994	0.218	0.111	0.039
总酸 total acid	0.941	0.206	0.338	0.119	Se	0.160	0.035	0.987	0.346
单宁 tannin	0.980	0.215	-0.199	-0.070	鲜味氨基酸 umami amino acid	0.986	0.216	-0.169	-0.059
膳食纤维 dietary fiber	0.262	0.057	0.965	0.338	甜味氨基酸 sweet amino acid	0.997	0.218	0.071	0.025
粗蛋白 crude protein	0.887	0.194	0.462	0.162	芳香味氨基酸 aromatic amino acid	0.944	0.207	0.330	0.116
粗脂肪 crude fat	0.443	0.097	0.897	0.314	苦味氨基酸 bitter amino acid	-0.985	-0.216	-0.170	-0.060
总糖 total sugar	-0.931	-0.204	0.365	0.128	必需氨基酸 EAA	0.995	0.218	0.103	0.036
还原糖 reducing sugar	-0.963	-0.211	0.270	0.095	总氨基酸 TAA	0.995	0.218	0.099	0.035
果糖 fructose	-0.974	-0.213	0.227	0.080	EAA 占 TAA 比例 EAA to TAA ratio	0.998	0.219	-0.060	-0.021
葡萄糖 glucose	-0.964	-0.211	0.267	0.093	特征值 eigenvalue	20.865		8.135	
蔗糖 sucrose	0.240	0.052	0.971	0.340	方差贡献率/% variance contribution rate	71.948		28.052	
P	0.507	0.111	-0.862	-0.302	累计方差贡献率/% cumulative variance contribution rate	71.948		100.000	
K	0.979	0.214	-0.203	-0.071					
Mg	-0.730	-0.160	-0.683	-0.240					
Ca	0.998	0.219	0.060	0.021					
Cu	0.469	0.103	0.883	0.310					

由表 11 可知,共提取出 2 个主成分,累计方差贡献率达 100%。第 1 主成分方差贡献率为 71.948%,主要代表粗蛋白、黄酮、单宁、总酸、K、Ca、Mn、Zn、鲜味、甜味和芳香味类氨基酸,反映竹笋口感。第 2 主成分方差贡献率为 28.052%,主要代表粗脂肪、膳食纤维、维生素 C、蔗糖、Cu 和 Se。

根据 D_n 值对金佛山方竹笋 3 个不同部位营养品质进行排序,其顺序为上部>中部>下部(表 12)。

表 12 金佛山方竹笋不同部位营养品质综合评价价值及排名

Table 12 Comprehensive evaluation value and ranking in *C. utilis* bamboo shoots of different parts

部位 part	主成分 1 得分 PC 1 score	主成分 2 得分 PC 2 score	D_n	排序 rank
上部 upper	5.034	0.984	3.898	1
中部 middle	-1.152	-3.214	-1.730	2
下部 lower	-3.881	2.230	-2.167	3

3 讨 论

竹笋综合品质直接决定其市场价值,金佛山方竹笋在不同出土高度及部位各营养成分含量均出现一定程度的差异,各物质含量常有交错现象。总体来看,出土高度为 0~10 cm 的金佛山竹笋营养品质综合评价价值(D_n)最高, D_n 随出土高度增加逐渐降低;不同部位方竹笋品质评价价值 D_n 表现为上部>中部>下部。

竹笋生长快速,营养、口感往往随出土高度发生变化,竹笋口感与含水率呈正相关,含水率越高,竹笋口感越好^[19]。本试验结果表明,出土高度 0~10 cm 时竹笋水分含量最高,含水率随出土高度变化趋势与笋竹笋水分含量变化趋势一致^[13]。竹笋的酸涩感和苦味程度通常体现在总酸、单宁和苦味类氨基酸含量上^[20],金佛山方竹笋在各个出土高度的苦味类氨基酸总量与麻竹(*Dendrocalamus latiflorus*)笋^[21]相当,远低于 5 种牡竹属(*Dendrocalamus*)笋用竹(37.39~52.89 mg/g)^[22],但总酸和单宁含量高于其他竹笋^[23]。总糖等是竹笋的甜味来源,本研究结果表明,在出土高度为 20~30 cm 时竹笋总糖含量最高。研究表明,还原糖、葡萄糖、果糖和蔗糖等糖类物质是植物光合作用主要产物^[24-25],竹子中新合成的光合作用产物先转化为可移动糖类如蔗糖,通过韧皮部运输到竹笋体内,

经酶反应合成还原性糖、果糖和葡萄糖参与代谢,或在 K^+ 的促进运输作用下将库中的蔗糖转化为淀粉以贮藏能量物质^[26-28]。本研究中,金佛山方竹笋还原糖、果糖和葡萄糖含量均随出土高度增加而逐渐升高,而蔗糖含量则相反,表现为逐渐降低。金佛山方竹笋矿质元素含量丰富,同一出土高度下,其含量均显著高于寿竹(*Phyllostachys bambusoides* f. *shouzhu*)笋^[29]、雷山方竹(*C. leishanensis*)笋^[30]及绿竹(*Bambusa oldhamii*)笋^[31]。植物萌发过程会伴随着一系列生理变化,蛋白质在酶的作用下分解成氨基酸,某些氨基酸又继续参与代谢,与糖类、脂类物质相互联系,竹笋萌发打破休眠前的一系列代谢会积累较高水平的氨基酸^[32-33]。金佛山方竹笋在出土高度 0~10 cm 时总氨基酸含量最高,显著高于其他 3 个出土高度。EAA 与 TAA 的比值反映竹笋中必需氨基酸的含量,EAA 与 TAA 比值越高,蛋白品质越好,联合国粮农组织/世界卫生组织的理想模式推荐比例为 40%左右^[34]。在本研究中,金佛山方竹笋 EAA 与 TAA 比值在不同出土高度间无显著差异,比值范围为 26.18%~28.25%;竹笋上部 EAA 与 TAA 比值显著高于中、下部,达 30.40%,蛋白质品质较好。金佛山方竹笋非必需氨基酸含量普遍较高^[35],其中,谷氨酸和天冬氨酸属于功能性氨基酸,谷氨酸具有介导神经信号转导,提高机体免疫等作用,天冬氨酸具有缓解疲劳,促进肝功能和治疗高血压等作用^[36-38],是优质的蛋白源。

金佛山方竹笋不同部位竹笋由于生长发育程度差异,营养物质含量具有明显变化。本研究表明金佛山方竹笋上部营养物质含量普遍高于下部笋,中部物质含量则位于上部和下部之间,与版纳甜龙竹笋^[15]、麻竹笋^[21]和雷竹笋^[39]不同部位营养分布特征表现基本一致。下部竹笋生长发育早于中、上部笋,对碳水化合物需求量大^[40],同时,竹笋从母竹获取生长发育的能源物质时,下部需要维持一定库量,从而能够继续向上运输各种营养物质^[41-42]。金佛山方竹笋下部总糖、还原糖、果糖、葡萄糖含量最高;适量的维生素摄入有益于增强机体免疫功能,竹笋下部维生素 C 的含量显著高于其他部位,远高于苦竹(*Pleioblastus amarus*)^[43]和毛金竹(*P. nigra* var. *henonis*)^[44];就黄酮含量而言,幼嫩的上部笋显著高于下部,而单宁含量低于早期发育的下部笋;金佛山方竹笋的各部位均含有丰富的矿质元素,K 在维持人体酸碱平衡上发挥着关键作用,相关研究表明其对高血压患者具有良好

的治疗作用^[45]。竹笋上部 K 平均含量达到 63.18 mg/g, 高于 Waikhom 等^[46]研究的 15 种竹笋中的 K 含量; P 不仅参与植物体内糖类合成, 还在糖类转化为脂类物质过程中发挥重要作用^[47]。本研究中, P 与粗脂肪含量从竹笋下部至上部含量先上升后下降, 二者在中部含量最高; Mg 是人体健康的重要营养元素之一, 具有多种生理功能, 金佛山方竹笋中部的 Mg 含量最高, 达 6.64 mg/g; Fe 作为生物必需的微量元素对人体健康有直接影响, 金佛山方竹笋下部 Fe 含量分别是上、中部的 4.7、2.8 倍, 可较好地补充人体所需的铁; 氨基酸是重要的蛋白来源, 金佛山方竹笋上部的粗蛋白、总氨基酸及必需氨基酸含量均显著高于中部和下部。

综上, 金佛山方竹笋出土高度关系到其营养品质和经济价值, 从笋品质各指标考虑, 金佛山方竹笋越幼嫩, 综合口感和品质越佳; 从经济价值考虑, 竹笋高度越高, 其笋产量和经济价值可实现最大化^[48]。因此应根据笋加工企业的笋产品和人们需求目标, 实现生产采收标准与笋品质的平衡。笋加工企业如以竹笋膳食纤维添加剂为产品, 则需优选纤维含量高的竹笋; 如以调味笋或鲜笋、笋干为目标, 可选较幼嫩的口感好的竹笋。据统计, 我国每年约 60% 竹笋用于加工^[49], 金佛山方竹笋兼备食用和药用价值, 不同部位营养成分含量不同, 在实际加工过程中需区别对待。金佛山方竹笋上部黄酮含量分别是中、下部的 1.1、1.9 倍, 与巴西蜂蜜^[50]相当, 结合其氨基酸含量可以看出, 3 个部位中, 竹笋上部的药用价值最高; 金佛山方竹笋中部 P、Mg 和谷氨酸等鲜味氨基酸含量高于其他部位; 金佛山方竹笋下部中 Fe 和 Se 等含量具有明显优势, 下部 Fe 含量分别是上、中部的 4.7、2.8 倍, Se 含量达到 1.53 $\mu\text{g/g}$, 二者含量均远高于多数绿色蔬菜, 可用于富铁和富硒食品开发。本研究对不同出土高度和部位金佛山方竹笋的营养组分对比分析, 可为金佛山方竹笋生产中的适时采收和产品加工提供科学参考, 为竹笋的开发利用如微量元素、营养及功能成分等的提取提供理论依据。

参考文献 (reference):

- [1] 伍虹雨, 林树燕, 丁雨龙, 等. 金佛山方竹果实发育特征及淀粉粒动态变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 150–158. WU H Y, LIN S Y, DING Y L, et al. Study on development characteristics and dynamic changes of starch granules in the fruit of *Chimonobambusa utilis*[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2023, 47(6): 150–158. DOI: 10.12302/j.issn.1000–2006.202206042.
- [2] 杨金来, 高贵宾, 张甫生, 等. 5 种彩色笋壳的金佛山方竹笋品质分析与评价[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 303–308. YANG J L, GAO G B, ZHANG F S, et al. Quality analysis and evaluation of five cultivars of *Chimonobambusa quadrangularis* shoots with color shell from Jinfoshan Mountain[J]. Food Sci, 2022, 43(6): 303–308. DOI: 10.7506/spkx1002–6630–20210414–199.
- [3] 任春春, 贾玉龙, 姜义龙, 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 C C, JIA Y L, LOU Y L, et al. Analysis of nutritional and functional components of bamboo shoots in *Chimonobambusa utilis*, Guizhou[J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(10): 214–221. DOI: 10.13995/j.cnki.11–1802/ts.026330.
- [4] 丁波, 殷建强, 刘世农, 等. 金佛山方竹研究进展及其开发利用[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(10): 175–178. DING B, YIN J Q, LIU S N, et al. Research progress of *Chimonobambusa utilis* and its development and utilization[J]. Guizhou Agric Sci, 2011, 39(10): 175–178. DOI: 10.3969/j.issn.1001–3601.2011.10.049.
- [5] 时俊帅, 谷瑞, 陈双林, 等. 不同海拔的高节竹笋蛋白质营养品质差异分析[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(2): 308–315. SHI J S, GU R, CHEN S L, et al. The effect of altitude on the protein nutritional value of *Phyllostachys prominens* bamboo shoots[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2019, 41(2): 308–315. DOI: 10.13836/j.jjau.2019037.
- [6] 伍明理, 代朝霞, 刘艳江, 等. 贵州 11 种竹笋营养成分分析及品质比较[J/OL]. 分子植物育种(2022–05–31). WU M L, DAI C X, LIU Y J, et al. Analysis of nutritional components and quality comparison of 11 edible bamboo shoots in Guizhou Province[J/OL]. Molecular Plant Breeding(2022–05–31). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220530.1433.006.html>.
- [7] 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 J J, BAI R H, DING X C. Comparison of nutrition and safety of two main edible bamboo shoots[J]. Food Res Dev, 2021, 42(8): 18–23. DOI: 10.12161/j.issn.1005–6521.2021.08.004.
- [8] 沈学桂, 申展, 杨邦国, 等. 覆盖雷竹林土壤高温胁迫对竹笋萌发和笋体大小的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(5): 1013–1021. SHEN X G, SHEN Z, YANG B G, et al. Effects of high soil temperature stress on bamboo shoot germination and shoot size in covered *Phyllostachys violascens* praecox forest[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2020, 42(5): 1013–1021. DOI: 10.13836/j.jjau.2020113.
- [9] 胡文杰, 庞宏东, 胡兴宜, 等. 竹林密度和施肥种类对幕阜山区毛竹笋产量和品质及土壤理化性质的影响[J]. 林业科学, 2021, 57(12): 32–42. HU W J, PANG H D, HU X Y, et al. Effects of bamboo forest density and fertilizer types on the yield and quality of *Phyllostachys edulis* bamboo shoots and soil physicochemical properties in Mufu Mountain area[J]. Sci Silvae Sin, 2021, 57(12): 32–42. DOI: 10.11707/j.1001–7488.20211204.
- [10] 胡德胜, 陈丽华, 胡俊靖, 等. 施肥对覆土栽培高节竹笋产量和品质的影响[J]. 浙江林业科技, 2021, 41(4): 50–55. HU D S, CHEN L H, HU J J, et al. Effect of fertilization on shoot yield and quality of *Phyllostachys prominens* under soil covered cultivation[J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2021, 41(4): 50–55. DOI: 10.3969/j.issn.1001–3776.2021.04.008.
- [11] 郭子武, 江志标, 陈双林, 等. 覆土栽培对高节竹笋品质的影响[J]. 广西植物, 2015, 35(4): 515–519. GUO Z W, JIANG Z B, CHEN S L, et al. Influence of soil covered cultivation on shoot quality of *Phyllostachys prominens*[J]. Guihaia, 2015, 35(4):

- 515–519. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201407042.
- [12] 董春风,赵一鹤.储藏时间和温度对甜龙竹笋采后品质的影响[J].竹子学报,2021,40(4):80–86. DONG C F, ZHAO Y H. Effects of storage time and temperature on postharvest quality of *Dendrocalamus brandisii* shoots[J]. J Bamboo Res, 2021, 40(4): 80–86. DOI: 10.12390/jbr2022040.
- [13] 杨奕,董文渊,邱月群,等.笋竹笋生长过程中营养成分的变化[J].东北林业大学学报,2015,43(1):80–82,87. YANG Y, DONG W Y, QIU Y Q, et al. Transformation of nutritional compositions in *Chimonobambusa tumidissinoda* shoots during growth process[J]. J Northeast For Univ, 2015, 43(1): 80–82, 87. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2015.01.004.
- [14] NIRMALA C, DAVID E, SHARMA M L. Changes in nutrient components during ageing of emerging juvenile bamboo shoots[J]. Int J Food Sci Nutr, 2007, 58(8): 612–618. DOI: 10.1080/09637480701359529.
- [15] 李荣,刀定伟,向明欢,等.版纳甜龙竹笋不同部位营养特征分析[J].林业科技开发,2010,24(4):76–78. LI R, DAO D W, XIANG M H, et al. Analysis on nutrient quantity in different parts of *Dendrocalamus hamiltonii* shoots[J]. China For Sci Technol, 2010, 24(4): 76–78. DOI: 10.3969/j.issn.1000–8101.2010.04.021.
- [16] 莫润宏,汤富彬,丁明,等.雷竹笋不同部位的游离氨基酸含量[J].浙江农业科学,2012,53(7):961–963. MO R H, TANG F B, DING M, et al. Contents of free amino acids in different parts of *Phyllostachys praecox* shoots[J]. J Zhejiang Agric Sci, 2012, 53(7): 961–963. DOI: 10.16178/j.issn.0528–9017.2012.07.039.
- [17] 冯会丽,吴正保,史彦江,等.基于因子分析的灰枣优良无性系果实品质评价[J].食品科学,2016,37(9):77–81. FENG H L, WU Z B, SHI Y J, et al. Fruit quality evaluation of superior clones of *Zizyphus jujuba* cv. Huizao based on factor analysis[J]. Food Sci, 2016, 37(9): 77–81. DOI: 10.7506/spkx1002–6630–201609015.
- [18] 杨蕾,洪林,刘兆俊,等.六个金柑品种果实品质与营养综合评价[J].浙江农业学报,2022,34(3):534–547. YANG L, HONG L, LIU Z J, et al. Comprehensive evaluation of fruit quality and nutrition of six kumquat varieties[J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2022, 34(3): 534–547. DOI: 10.3969/j.issn.1004–1524.2022.03.14.
- [19] 詹舟,邓琳,何文志,等.不同种源龙竹竹笋营养价值分析[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(3):204–209. ZHAN H, DENG L, HE W Z, et al. Nutrient analysis of *Dendrocalamus giganteus* shoots from different provenances[J]. J Southwest For Univ (Nat Sci), 2017, 37(3): 204–209. DOI: 10.11929/j.issn.2095–1914.2017.03.033.
- [20] 章志远,丁兴萃,崔逢欣,等.感官评定方法确定麻竹笋苦涩味物质成分及与口感的关系[J].食品科学,2017,38(5):167–173. ZHANG Z Y, DING X C, CUI F X, et al. Identification of bitter and astringent components in ma bamboo shoots and their relationship with taste by sensory evaluation[J]. Food Sci, 2017, 38(5): 167–173. DOI: 10.7506/spkx1002–6630–201705027.
- [21] 李雪蕾,丁兴萃,张闪闪,等.不同光强下麻竹笋不同部位苦涩味物质含量的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(3):161–166. LI X L, DING X C, ZHANG S S, et al. The distributions of bitter and astringent taste compounds in the bamboo shoot of *Dendrocalamus latiflorus* under different light intensities[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2015, 39(3): 161–166. DOI: 10.3969/j.issn.1000–2006.2015.03.029.
- [22] 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):4–8,19. CHEN S H, MA L J, DING Z H, et al. Comparison of nutritional components in bamboo shoots of five *Dendrocalamus* species[J]. J Bamboo Res, 2018, 37(4): 4–8, 19. DOI: 10.19560/j.cnki.issn1000–6567.2018.04.002.
- [23] 徐森,谷瑞,陈双林,等.竹子箨叶形态性状的种间差异及其与竹笋食味品质指标的关系[J].生态学杂志,2022,41(2):270–277. XU S, GU R, CHEN S L, et al. Interspecific differences in morphological traits of sheath leaves and their relationships with taste quality indices of bamboo shoots[J]. Chin J Ecol, 2022, 41(2): 270–277. DOI: 10.13292/j.1000–4890.202202.013.
- [24] WU X Y, HAN W, YANG Z Q, et al. The difference in temperature between day and night affects the strawberry soluble sugar content by influencing the photosynthesis, respiration and sucrose phosphatase synthase[J]. Hort Sci (Prague), 2021, 48(4): 174–182. DOI: 10.17221/169/2020–hortsci.
- [25] REN R H, WAN Z W, CHEN H W, et al. The effect of inter-varietal variation in sugar hydrolysis and transport on sugar content and photosynthesis in *Vitis vinifera* L. leaves[J]. Plant Physiol Biochem, 2022, 189: 1–13. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.07.031.
- [26] BRAUN D M. Phloem loading and unloading of sucrose: what a long, strange trip from source to sink[J]. Annu Rev Plant Biol, 2022, 73: 553–584. DOI: 10.1146/annurev-arplant-070721–083240.
- [27] 丁雨龙,林树燕,魏强,等.竹子发育生物学研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):23–40. DING Y L, LIN S Y, WEI Q, et al. Advances in developmental biology of bamboos[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2022, 46(6): 23–40. DOI: 10.12302/j.issn.1000–2006.202208067.
- [28] 徐功勋,崔晓文,张新昊,等.桃结果枝压力束缚对树体矿质营养和碳同化产物分配的影响[J].沈阳农业大学学报,2021,52(1):90–95. XU G X, CUI X W, ZHANG X H, et al. Effects of pressure treatment on the distribution of mineral nutrition and carbon assimilation products on peach fruiting branches[J]. J Shenyang Agric Univ, 2021, 52(1): 90–95. DOI: 10.3969/j.issn.1000–1700.2021.01.012.
- [29] 甘小洪,唐翠彬,温中斌,等.寿竹笋的营养成分研究[J].天然产物研究与开发,2013,25(4):494–499. GAN X H, TANG C B, WEN Z B, et al. Nutrient components of *Phyllostachys bambusoides* f. *shouzhu* shoot[J]. Nat Prod Res Dev, 2013, 25(4): 494–499. DOI: 10.16333/j.1001–6880.2013.04.013.
- [30] 朱潇,刘艳江,伍明理,等.雷山方竹笋营养成分对比分析[J].经济林研究,2022,40(3):273–280. ZHU X, LIU Y J, WU M L, et al. Comparative analysis of nutrients from bamboo shoots of *Chimonobambusa leishanensis*[J]. Non Wood For Res, 2022, 40(3): 273–280. DOI: 10.14067/j.cnki.1003–8981.2022.03.030.
- [31] 朱勇,罗朝光.绿竹笋营养成分的测定与分析[J].经济林研究,2012,30(3):103–105. ZHU Y, LUO C G. Analysis of nutrient components in *Dendrocalamopsis oldhami* bamboo shoot[J]. Non-wood For Res, 2012, 30(3): 103–105. DOI: 10.14067/j.cnki.1003–8981.2012.03.016.
- [32] 孙建,周红英,乐美旺,等.芝麻种子萌发动态及其代谢生理变化研究[J].中国农业科技导报,2020,22(8):41–48. SUN J, ZHOU H Y, LE M W, et al. Germination dynamics and physiological changes of metabolism in sesame seed[J]. J Agric Sci Technol, 2020, 22(8): 41–48. DOI: 10.13304/j.nykjdb.

- 2019.0452.
- [33] 魏利斌, 苏小雨, 高桐梅, 等. 芝麻芽菜的氨基酸动态变化及营养风味评价[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 63–70. WEI L B, SU X Y, GAO T M, et al. Dynamic changes of amino acids and nutrition and taste evaluation of sesame sprouts[J]. Food Res Dev, 2022, 43(11): 63–70. DOI: 10.12161/j.issn.1005–6521.2022.11.009.
- [34] Energy and protein requirements; report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation[J]. World Health Organ Tech Rep Ser, 1985, 724: 1–206.
- [35] 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 Z A, GENG Y Y, HUANG S, et al. Analysis and comprehensive evaluation of nutritional quality of bamboo shoots from different cultivars[J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(3): 262–268. DOI: 10.13386/j.issn1002–0306.2022030236.
- [36] ZHANG M J, MA Y R, CHE X Y, et al. Comparative analysis of nutrient composition of *Caulerpa lentillifera* from different regions[J]. J Ocean Univ China, 2020, 19(2): 439–445. DOI: 10.1007/s11802–020–4222–x.
- [37] VAN SADELHOFF J H J, WIERTSEMA S P, GARSSSEN J, et al. Free amino acids in human milk: a potential role for glutamine and glutamate in the protection against neonatal allergies and infections[J]. Front Immunol, 2020, 11: 1007. DOI: 10.3389/fimmu.2020.01007.
- [38] 郇思琪, 刘登勇, 王笑丹, 等. 食品中呈鲜味物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 333–339. HUAN S Q, LIU D Y, WANG X D, et al. Research advances on umami substances in food[J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(21): 333–339. DOI: 10.13386/j.issn1002–0306.2020020157.
- [39] 孙小青. 雷竹笋主要有效成分分析及其活性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014. SUN X Q. The main active ingredient analysis and activity of *Phyllostachys praececox* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014.
- [40] 程路芸, 温星, 马丹丹, 等. 毛竹快速生长过程中碳水化合物的时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 261–267. CHENG L Y, WEN X, MA D D, et al. Spatial and temporal change of carbohydrates during rapid growth processes of *Phyllostachys edulis* [J]. J Zhejiang A F Univ, 2017, 34(2): 261–267. DOI: 10.11833/j.issn.2095–0756.2017.02.009.
- [41] 刘毅, 邓琳, 李鹏程, 等. 竹子快速生长过程中糖分代谢与运输机制研究[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 104–108. LIU Y, DENG L, LI P C, et al. Study on sugar metabolism and transport mechanism during the rapid growth of bamboo[J]. World Bamboo Rattan, 2022, 20(4): 104–108. DOI: 10.12168/sjztx.2022.04.022.
- [42] WANG S G, PEI J L, LI J, et al. Sucrose and starch metabolism during *Fargesia yunnanensis* shoot growth [J]. Physiol Plant, 2020, 168(1): 188–204. DOI: 10.1111/ppl.12934.
- [43] 党丽敏, 陈东晖, 尹爱武. 苦竹竹笋营养成分分析[J]. 广州化工, 2017, 45(14): 133–134, 152. DANG L M, CHEN D H, YIN A W. Analysis of nutritional components in bamboo shoots of *Pleioblastus amarus* [J]. Guangzhou Chem Ind, 2017, 45(14): 133–134, 152. DOI: 10.3969/j.issn.1001–9677.2017.14.046.
- [44] 王国玉, 马师, 代朝霞. 毛金竹竹笋营养成分分析[J]. 现代农业科技, 2014(24): 282, 284. WANG G Y, MA S, DAI Z X. Analysis on nutrients from bamboo shoots of *Phyllostachys nigra* var. *henonis* [J]. Mod Agric Sci Technol, 2014(24): 282, 284. DOI: 10.3969/j.issn.1007–5739.2014.24.161.
- [45] WOLF M B. Whole body acid-base and fluid-electrolyte balance: a mathematical model[J]. Am J Physiol Renal Physiol, 2013, 305(8): 1118–1131. DOI: 10.1152/ajprenal.00195.2013.
- [46] WAIKHOM S D, LOUIS B, SHARMA C K, et al. Grappling the high altitude for safe edible bamboo shoots with rich nutritional attributes and escaping cyanogenic toxicity [J]. Biomed Res Int, 2013, 2013: 289285. DOI: 10.1155/2013/289285.
- [47] 余旋. 四川核桃主产区根际解磷细菌研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011. YU X. A study on phosphate-solubilizing bacteria of rhizosphere soil in walnut plant grown in Sichuan Province [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2011.
- [48] 白祖云, 朱培英, 张高琦, 等. 筴竹笋采笋规格研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 124–125, 135. BAI Z Y, ZHU P Y, ZHANG G Q, et al. Study on harvesting specifications of *Qiongzhusua tumidissinoda* shoots [J]. J Anhui Agric Sci, 2021, 49(7): 124–125, 135. DOI: 10.3969/j.issn.0517–6611.2021.07.035.
- [49] 蒋茜, 刘芳芳, 凡彩凤, 等. 竹笋加工及副产物利用研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(2): 141–145. JIANG X, LIU F F, FAN C F, et al. Research progress in bamboo shoot processing and its comprehensive utilization [J]. Food Ferment Sci Technol, 2021, 57(2): 141–145. DOI: 10.3969/j.issn.1674–506X.2021.02–022.
- [50] TANLEQUE-ALBERTO F, JUAN-BORRÁS M, ESCRICHE I. Antioxidant characteristics of honey from *Mozambique* based on specific flavonoids and phenolic acid compounds [J]. J Food Compos Anal, 2020, 86: 103377. DOI: 10.1016/j.jfca.2019.103377.

(责任编辑 李燕文)