



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 S L, et al. Altitude effect on nutrition, taste and safety quality based on heavy metals of *Phyllostachys edulis* spring shoots[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 144–152.

毛竹春笋营养、食味和基于重金属的安全品质的海拔效应

徐 森^{1,2}, 谷 瑞¹, 陈双林^{1*}, 郭子武¹, 钟子龙³, 唐昌贻³, 周紫球³

(1. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 3. 浙江省遂昌县自然资源和规划局, 浙江 遂昌 323300)

摘要:【目的】海拔是多个环境因子的综合反映, 海拔变化会引起光照、温度、湿度等环境条件的剧烈变化, 对作物品质有重要影响。竹笋是传统森林蔬菜, 揭示海拔对竹笋综合品质的影响, 对于高品质竹笋培育有着重要的生产指导意义。【方法】分析测定了4个海拔梯度((250±50), (550±50), (750±50), (1 100±50) m)毛竹春笋的营养品质、食味品质和基于重金属的安全品质指标。【结果】随海拔升高, 毛竹春笋脂肪、淀粉、可溶性糖、检测到的18种氨基酸中大部分氨基酸和总氨基酸含量均呈倒“V”型变化趋势, 而蛋白质含量相反, 人体必需氨基酸含量和比例总体上呈降低趋势, 说明海拔对毛竹春笋营养品质有较明显的影响, 过低的海拔不利于竹笋营养品质的形成。毛竹春笋草酸、总酸和甜味氨基酸含量及其比例随海拔升高均呈上升趋势, 苦味、芳香类氨基酸含量及其比例总体上相反, 纤维素和木质素含量均呈“V”型变化趋势, 而糖酸比相反, 单宁、鲜味氨基酸含量及其比例随海拔梯度间差异不显著, 说明过高的海拔会显著提高毛竹春笋的酸涩味和粗糙度, 而明显降低竹笋的甜味。毛竹春笋铅、锌含量及其单项污染指数和铅、锌、铜、镉综合污染指数随海拔升高均呈“V”型变化趋势, 而铜、镉含量及其单项污染指数总体上呈上升趋势, 说明海拔对毛竹春笋重金属残留也会有较大的影响, 过低和过高海拔竹笋安全品质明显降低, 但不同海拔竹笋重金属含量均在国家食品安全标准范围内。【结论】海拔对毛竹春笋营养品质、食味品质和基于重金属的安全品质有较明显的影响, 试验区海拔750 m的毛竹春笋品质较好。

关键词: 毛竹; 春笋; 海拔; 品质

中图分类号: S795.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2021)01-0144-09

Altitude Effect on Nutrition, Taste and Safety Quality based on Heavy Metals of *Phyllostachys edulis* Spring Shoots

XU Sen^{1,2}, GU Rui¹, CHEN Shuanglin^{1*}, GUO Ziwu¹, ZHONG Zilong³,
TANG Changyi³, ZHOU Ziqiu³

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Suichang Forestry Bureau of Zhejiang, Suichang, Zhejiang 323300, China)

收稿日期: 2020-06-22 修回日期: 2020-10-12

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0600903)和浙江省重点研发专项(2017C02016)

Project supported by the National Key R&D Plan (2016YFD0600903) and Zhejiang Province Key R&D Project (2017C02016)

作者简介: 徐森, orcid.org/0000-0003-0681-4614, 1440791816@qq.com; *通信作者: 陈双林, 研究员, 博士, 主要从事竹林生态与培育研究, orcid.org/0000-0003-0223-9712, cslbamboo@126.com。

Abstract: [Objective] Altitude is a comprehensive reflection of many environmental factors. The change in altitude will cause drastic changes in environmental conditions such as light, temperature and humidity, which have an important impact on crop quality. Bamboo shoot is a traditional forest vegetable, which reveals the effect of altitude on its comprehensive quality. The effect of altitude has important guiding significance for the cultivation of high-quality bamboo shoots. [Method] The nutritional quality, eating quality and safety quality index based on heavy metals of *Phyllostachys edulis* spring shoots were analyzed and determined at four altitude gradients ((250±50), (550±50), (750±50), (1 100±50) m). [Result] With the increase of altitude, the contents of fat, starch, soluble sugar, most of the 18 amino acids and total amino acids in bamboo spring shoots showed an inverted “V” trend, while the protein content was on the contrary. The content and proportion of essential amino acids in human body show a decreasing trend as a whole, indicating that altitude had a significant effect on the nutritional quality of bamboo shoots, and too low altitude was not conducive to the formation of nutritional quality of bamboo shoots. The contents and ratios of oxalic acid, total acid and sweet amino acids in bamboo spring shoots increased with the increase of altitude, while the contents and ratios of bitter and aromatic amino acids were on the contrary, while the contents of cellulose and lignin showed a “V” trend. On the contrary, there was no significant difference in the content and ratio of tannin and fresh amino acids among altitude gradients, indicating that too high altitude could significantly heighten the sour taste and roughness of bamboo spring shoots, and significantly reduce the sweetness of bamboo shoots. The contents of lead, zinc and their single pollution indexes and the comprehensive pollution index of lead, zinc, copper and cadmium in bamboo spring shoots showed a V-shaped trend with the increase of altitude, while the contents of copper and cadmium and their single pollution indexes were on the contrary, indicating that altitude also had a great effect on heavy metal residues in bamboo spring shoots, and the safety quality of bamboo shoots decreased significantly at too low and too high altitudes, but the heavy metal content of bamboo shoots at different altitudes was within the scope of national food safety standards. [Conclusion] The study shows that altitude has obvious effects on the nutritional quality, eating quality and safety quality of *Ph. edulis* spring shoots based on heavy metals, and the spring shoot quality of bamboo in the experimental area is better at 750 m above sea level.

Keywords: *Phyllostachys edulis*; spring shoots; altitude; quality

【研究意义】作物品质包括营养品质、食味品质和安全品质等,其形成取决于自身遗传因素,但同时也受到气候因素和土壤质地等的影响^[1]。海拔是一个综合性的环境因子,一般来说,海拔升高,光照强度增强、温度降低、湿度增大、土壤肥力下降,因而,对作物的生长、分布和组成成分会产生相应的影响,即对作物品质产生明显影响^[2]。【前人研究进展】随海拔升高,突尼斯软籽石榴(*Punica granatum*)的外观品质和营养品质呈先升高后降低趋势,海拔 1 450 m 时果实的综合性状最好^[3];富士苹果(*Pyrus malus*)糖酸比升高,外观品质和食味品质明显改善,即高海拔有利于富士苹果的品质形成^[4]。可见,海拔对作物品质形成的影响较大,且不同作物品质形成对海拔梯度的响应存在种间差异。同样,有研究^[5]认为海拔作为一个复合因子,对竹笋品质也有影响,如海拔对厚竹(*Phyllostachys edulis* ‘Pachyloen’)笋淀粉和粗纤维含量影响较大,随海拔升高,淀粉和粗纤维含量下降。而高海拔则利于缺苞箭竹(*Fargesia denudata*)笋蛋蛋白质、氨基酸等物质的积累,不利于纤维类物质的积累^[6]。也有研究^[7]表明,海拔对竹笋品质影响不大,如不同海拔梯度合江方竹(*Chimonobambusa hejiangensis*)笋营养物质含量变化并不明显,风味也基本一致。由此可见,不同竹种的竹笋品质海拔梯度间的变化规律不同,开展不同海拔竹笋品质分异的研究,对于指导高品质竹笋培育具有重要意义。【本研究切入点】毛竹(*Phyllostachys edulis*)隶属竹亚科刚竹属,是我国分布面积最大的竹种,具有生长快、生物量大、竹材和竹笋产量高等特点^[8]。毛竹笋味美质嫩,高蛋白、低脂肪,富含膳食纤维和人体所需的赖氨酸、色氨酸和苏氨酸等氨基酸以及钙、铁、磷等微量元素^[9],是博得消费者青睐的森林蔬菜。已有研究表明,不同区域、产地和立地条件毛竹笋品质差异较大,其中,海拔

对毛竹笋品质有重要影响,如王海霞等^[10]研究表明海拔500 m是江西省毛竹笋营养成分的分界线,500 m以上海拔的毛竹笋营养品质优于500 m以下海拔的;邹跃国^[11]研究发现随海拔升高,毛竹笋总糖、可溶性糖、磷、铁含量提高,纤维素、钙含量降低,而竹笋蛋白质和脂肪含量变化不明显。上述研究仅局限在竹笋营养品质上,而海拔对毛竹笋营养品质、食味品质和安全品质综合影响的研究尚未见报道。【拟解决的关键问题】本研究以浙江省遂昌县垂直分布明显、经营水平基本一致的4个海拔梯度的毛竹林为试验对象,测定不同海拔毛竹春笋的营养品质、食味品质和基于重金属的安全品质指标,探究海拔对毛竹春笋综合品质是否有影响,如有影响,明确高品质毛竹春笋培育的适宜海拔,为试验区高品质毛竹笋高效培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省丽水市遂昌县(28°13′~28°49′ N, 118°41′~119°30′ E)新路湾镇,属中亚热带季风气候,年平均气温16.8℃,极端高温40.1℃,极端低温-9.7℃,全年≥10℃的平均积温5 273℃,年平均无霜期251 d,年平均降水量1 613 mm,年平均蒸发量1 385 mm,年平均相对湿度79%。该地区海拔千米以上山峰有十余座,毛竹林资源丰富,全镇毛竹林面积超1 000 hm²,毛竹林经营较为粗放,主要实施季节性留笋养竹和选择性伐竹措施,不进行林地垦复合和施肥等措施。

1.2 试验方法

2019年4月,根据试验地毛竹林垂直分布状况,选取立地条件和经营水平基本一致的4个海拔梯度((250±50), (550±50), (750±50), (1 100±50) m)毛竹林,分别设置20 m×20 m样地各3个,调查试验林立竹密度、立竹胸径、立竹年龄结构等林分结构状况,并在各海拔梯度毛竹林每个样地中随机挖取出土高度5 cm左右的样笋各10株,放入冰盒后带回实验室待测(表1)。

清理样笋表面泥土和杂物,剥去笋箨,去除不可食用的笋基部,然后将样笋用粉碎机粉碎,匀浆用于蛋白质、脂肪、可溶性糖、游离氨基酸、草酸、总酸和重金属离子等的测定。并取部分鲜样于60℃的烘箱中烘至恒质量,研磨成粉末用于纤维素和木质素的测定。蛋白质含量采用凯氏定氮法测定^[12],脂肪含量采用索式抽提法测定^[13],淀粉含量采用蒽酮比色法测定,可溶性糖含量采用铜还原碘量法测定^[14],草酸含量采用反相高效液相色谱法测定^[15],总酸含量采用滴定法测定^[16],单宁含量采用分福林酚比色法测定^[17],游离氨基酸含量采用日立L-8900氨基酸分析仪测定^[18],纤维素、木质素含量采用硫酸水解法测定^[19],铅、锌、镉、铜含量采用电感耦合等离子质谱法测定^[20]。

表1 试验毛竹林林分结构
Tab.1 Stand structure of *Phyllostachys edulis* forest

指标 Index	海拔梯度/m Altitude			
	250±50	550±50	750±50	1100±50
立竹密度/(株·hm ⁻²) Bamboo density	2 125±179	1 675±160	1 600±126	1 800±158
立竹胸径/cm Bamboo breast diameter	11.93±1.02	11.47±0.92	8.72±0.97	8.23±0.64
立竹年龄(1度:2度:3度) Bamboo age	1.86:3.21:1.00	4.13:2.75:1.00	0.93:1.21:1.00	3.75:2.08:1.00

1.3 数据分析

试验数据在Excel 2010统计软件中进行整理和图表制作,在SPSS 23.0统计软件中对数据进行单因素方差分析和LSD检验,分析不同海拔梯度毛竹春笋品质间差异。毛竹春笋安全品质指标采用单项污染指数(公式1)和综合污染指数(公式2)^[21]进行评价。试验数据均为平均值±标准差,显著性水平设置为α=0.05。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式(1)中, P_i 为某污染物的污染指数, C_i 为该污染物实测值(mg/kg), S_i 为该污染物评价标准(mg/kg),采用食品中污染物限量标准(铅为0.1 mg/kg,锌为20 mg/kg,铜为10 mg/kg,镉为0.05 mg/kg)。

$$P = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式(2)中, P 为第 j 个笋样的质量综合指数, $P_{ij\max}$ 为第 j 个笋样 i 污染物单项污染指数中的最大值, $P_{ij\text{ave}}$ 为第 j 个笋样 i 污染物单项污染指数中的平均值。计算出综合污染指数 P , $P < 1$,表示未污染; $P \geq 1$ 表示受到污染, P 越大污染越严重。

2 结果与分析

2.1 海拔对毛竹春笋营养品质的影响

由表2分析可知,随海拔升高,毛竹春笋蛋白质含量呈先降低后升高趋势,海拔550 m的毛竹春笋蛋白质含量显著低于其他海拔;脂肪、淀粉和可溶性糖含量均呈倒“V”型趋势,海拔550,750 m的毛竹春笋脂肪含量差异不显著,均显著高于海拔250,1 100 m的毛竹春笋。淀粉含量海拔550 m的毛竹春笋显著高于海拔250 m的毛竹春笋,其他海拔梯度间差异不显著;海拔550,750,1 100 m的毛竹春笋可溶性糖含量无显著差异,均显著高于海拔250 m的毛竹春笋。试验区毛竹春笋中共检测到18种游离氨基酸,大部分氨基酸含量随海拔的升高也呈倒“V”型变化趋势,其中,天冬氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸、 γ -氨基丁酸和精氨酸含量不同海拔梯度间无显著差异。海拔750 m的毛竹春笋苏氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、组氨酸含量均最高,海拔250 m的最低。随海拔升高,总氨基酸含量呈倒“V”型趋势,海拔750 m的毛竹春笋总氨基酸含量显著高于海拔250,550 m的毛竹春笋;人体必需氨基酸(缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸)含量及其比例总体上呈降低趋势,海拔250,550,750 m的毛竹春笋的人体必需氨基酸含量显著高于海拔1 100 m,且前三者间无显著差异;海拔750,1 100 m的毛竹春笋人体必需氨基酸比例显著低于海拔250,550 m,且前二者间及后二者间均无显著差异。可见,海拔对毛竹春笋的营养品质有较明显的影响,其中,试验区毛竹春笋营养品质以750 m海拔的相对较好。

2.2 海拔对毛竹春笋食味品质的影响

由表3分析可知,毛竹春笋单宁含量不同海拔间差异均不显著;草酸和总酸含量随海拔升高均呈上升趋势,其中,草酸含量海拔1 100 m的毛竹春笋显著高于海拔250 m的毛竹春笋;总酸含量海拔1 100 m的毛竹春笋显著高于海拔250,550 m的毛竹春笋。纤维素和木质素含量随海拔升高均呈“V”型趋势,海拔1 100 m的毛竹春笋纤维素含量显著高于其它海拔;木质素含量海拔1 100 m的毛竹春笋显著高于海拔550 m的毛竹春笋,而其他海拔梯度间无显著差异。糖酸比随海拔升高呈倒“V”型趋势,海拔550 m的毛竹春笋显著高于海拔1 100 m的毛竹春笋,其它海拔梯度间差异不显著。随海拔升高,毛竹春笋鲜味氨基酸(天冬氨酸和谷氨酸)含量及其比例均呈“V”型趋势,且均以海拔1 100 m的最高,但4个海拔梯度间差异均不显著。苦味氨基酸(缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、色氨酸)含量及其比例和芳香类氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸)含量及其比例随海拔升高总体上均呈降低趋势,海拔1 100 m的毛竹春笋苦味氨基酸含量显著低于其他海拔;苦味氨基酸比例海拔250,550 m的毛竹春笋显著高于海拔750,1 100 m的毛竹春笋;海拔250,550 m处芳香类氨基酸显著高于海拔750,1 100 m的毛竹春笋,而与海拔250 m无显著差异;海拔250,550 m毛竹春笋芳香类氨基酸比例与海拔750,1 100 m差异显著。而甜味氨基酸(甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸)含量及其比例与苦味氨基酸的变化规律相反。综合分析认为,海拔对毛竹春笋的食味品质也有较明显的影响,其中,试验区海拔750 m的毛竹春笋酸涩味和粗糙度较低,甜味高,竹笋适口性较好。

表 2 不同海拔梯度毛竹春笋营养品质

Tab.2 Nutrition quality of *Phyllostachys edulis* spring shoots under different altitudes

指标 Index	海拔梯度/m Altitude			
	250±50	550±50	750±50	1 100±50
蛋白质/(mg·g ⁻¹) Protein	32.80±0.36 ^a	25.07±1.31 ^c	29.97±0.32 ^b	31.93±1.70 ^{ab}
脂肪/(mg·g ⁻¹) Fat	11.33±0.58 ^c	17.00±1.00 ^a	19.00±2.65 ^a	14.33±2.51 ^b
淀粉/(mg·g ⁻¹) Starch	19.47±1.23 ^b	24.23±1.46 ^a	23.00±1.46 ^{ab}	20.67±2.54 ^{ab}
可溶性糖/(mg·g ⁻¹) Soluble sugar	18.00±1.00 ^b	25.43±1.03 ^a	26.17±1.50 ^a	24.30±0.89 ^a
天冬氨酸/(mg·g ⁻¹) Aspartic acid	0.31±0.15 ^a	0.26±0.04 ^a	0.42±0.16 ^a	0.30±0.06 ^a
谷氨酸/(mg·g ⁻¹) Glutamic acid	0.25±0.06 ^a	0.27±0.05 ^a	0.20±0.06 ^a	0.34±0.12 ^a
苏氨酸/(mg·g ⁻¹) Threonine	0.22±0.03 ^b	0.21±0.02 ^b	0.44±0.06 ^a	0.40±0.14 ^a
丝氨酸/(mg·g ⁻¹) Serine	0.18±0.11 ^b	0.35±0.09 ^{ab}	0.59±0.13 ^a	0.52±0.17 ^a
甘氨酸/(mg·g ⁻¹) Glycine	0.15±0.03 ^b	0.15±0.01 ^b	0.35±0.07 ^a	0.30±0.13 ^a
丙氨酸/(mg·g ⁻¹) Alanine	0.47±0.05 ^b	0.41±0.02 ^b	0.83±0.09 ^a	0.74±0.24 ^a
缬氨酸/(mg·g ⁻¹) Valine	0.35±0.03 ^b	0.32±0.02 ^b	0.56±0.04 ^a	0.52±0.10 ^a
胱氨酸/(mg·g ⁻¹) Cysteine	0.02±0.01 ^b	0.04±0.01 ^{ab}	0.06±0.02 ^a	0.05±0.02 ^{ab}
蛋氨酸/(mg·g ⁻¹) Methionine	0.18±0.03 ^b	0.19±0.01 ^b	0.30±0.02 ^a	0.31±0.09 ^a
异亮氨酸/(mg·g ⁻¹) Isoleucine	0.22±0.02 ^b	0.22±0.01 ^b	0.40±0.03 ^a	0.40±0.11 ^a
亮氨酸/(mg·g ⁻¹) Leucine	0.42±0.05 ^b	0.43±0.03 ^b	0.86±0.09 ^a	0.81±0.28 ^a
酪氨酸/(mg·g ⁻¹) Tyrosine	4.50±0.12 ^a	4.61±0.70 ^a	3.31±0.62 ^b	2.29±0.55 ^b
苯丙氨酸/(mg·g ⁻¹) Phenylalanine	0.30±0.03 ^a	0.28±0.04 ^a	0.48±0.05 ^a	0.46±0.17 ^a
γ-氨基正丁酸/(mg·g ⁻¹) Gamma-aminobutyric acid	0.67±0.08 ^a	0.69±0.05 ^a	1.23±0.05 ^a	1.29±0.13 ^a
赖氨酸/(mg·g ⁻¹) Lysine	0.04±0.00 ^b	0.09±0.01 ^{ab}	0.06±0.05 ^{ab}	0.15±0.08 ^a
组氨酸/(mg·g ⁻¹) Histidine	0.12±0.02 ^b	0.12±0.01 ^b	0.20±0.01 ^a	0.20±0.07 ^a
精氨酸/(mg·g ⁻¹) Arginine	0.19±0.08 ^a	0.11±0.07 ^a	0.21±0.16 ^a	0.04±0.04 ^a
脯氨酸/(mg·g ⁻¹) Proline	0.50±0.14 ^{ab}	0.40±0.14 ^b	0.58±0.10 ^{ab}	0.64±0.05 ^a
总氨基酸/(mg·g ⁻¹) Total amino acid	9.10±0.68 ^b	9.16±0.28 ^b	11.08±0.09 ^a	9.76±1.03 ^{ab}
人体必需氨基酸/(mg·g ⁻¹) Essential amino acid	6.01±0.21 ^a	6.15±0.52 ^a	5.96±0.30 ^a	4.93±0.34 ^b
人体必需氨基酸比例/% Proportion of essential amino acid	66.26±3.27 ^a	67.09±4.05 ^a	53.80±3.14 ^b	50.79±2.79 ^b

同行比较,不同小写字母表示不同海拔梯度间差异显著($P<0.05$),下同

Comparing with peers, the difference of lowercase letters indicates that there are significant differences among different elevation gradients($P<0.05$), the same below

2.3 海拔对毛竹春笋重金属残留的影响

由表 4 分析可知,随海拔升高,毛竹春笋铅、锌含量和单项污染指数均呈“V”型趋势,海拔 250 m 的毛竹春笋铅含量和单项污染指数最高,显著高于海拔 750 m 的毛竹春笋,而与海拔 250, 1 100 m 的差异不显著;而海拔 1 100 m 的毛竹春笋锌含量和单项污染指数显著高于其他海拔。铜、镉含量和单项污染指数总体上随海拔升高呈上升趋势,海拔 1 100 m 的毛竹春笋铜含量和单项污染指数最高,略高于海拔 550, 750 m, 显著高于海拔 250 m 的毛竹春笋;海拔 750 m 的毛竹春笋镉含量和单项污染指数最高,与海拔 1 100 m 的无显著差异,而与海拔 550, 750 m 的毛竹春笋差异显著。综合污染指数随海拔升高呈“V”型变化,海拔 750 m 的毛竹春笋综合污染指数最低,略低于海拔 550 m 的,但显著低于海拔 250, 1100 m 的毛竹春笋。说明,海拔对毛竹春笋重金属残留也会有较大的影响,但试验区毛竹春笋重金属含量均在国家食品安全标准范围内,其中,海拔 750 m 的毛竹春笋重金属残留少,竹笋安全品质较好。

表 3 不同海拔梯度毛竹春笋呈味物质和粗糙度物质含量
Tab.3 Contents of taste substances and roughness substances of *Phyllostachys edulis* spring shoots from different altitudes

指标 Index	海拔梯度/m Altitude			
	250±50	550±50	750±50	1100±50
单宁/(mg·g ⁻¹) Tannin	6.20±0.26 ^a	6.18±0.77 ^a	6.62±0.51 ^a	6.88±0.51 ^a
草酸/(mg·g ⁻¹) Oxalic	2.13±0.04 ^b	2.62±0.24 ^a ^b	2.83±0.07 ^{ab}	3.22±0.84 ^a
总酸/(mg·g ⁻¹) Total acid	1.63±0.32 ^c	1.83±0.18 ^{bc}	2.38±0.42 ^{ab}	2.43±0.06 ^a
纤维素/(mg·g ⁻¹) Cellulose	62.30±1.32 ^c	61.47±1.55 ^c	69.30±1.20 ^b	72.60±0.53 ^a
木质素/(mg·g ⁻¹) Lignose	26.02±2.06 ^{ab}	24.87±2.18 ^b	28.26±1.73 ^{ab}	29.44±0.74 ^a
糖酸比/(mg·g ⁻¹) Sugar-acid ratio	11.25±1.61 ^{ab}	14.04±1.82 ^a	11.29±2.73 ^{ab}	10.01±0.22 ^b
鲜味氨基酸/(mg·g ⁻¹) Delicious amino acid	0.56±0.20 ^a	0.53±0.04 ^a	0.62±0.16 ^a	0.64±0.09 ^a
苦味氨基酸/(mg·g ⁻¹) Bitter amino acid	5.79±0.22 ^a	5.88±0.65 ^a	5.60±0.41 ^a	4.47±0.43 ^b
甜味氨基酸/(mg·g ⁻¹) Sweet amino acid	1.52±0.35 ^b	1.52±0.25 ^b	2.80±0.38 ^a	2.60±0.70 ^a
芳香类氨基酸/(mg·g ⁻¹) Aromatic amino acid	4.79±0.16 ^a	4.89±0.69 ^a	3.79±0.57 ^b	2.75±0.44 ^c
鲜味氨基酸比例/% Proportion of delicious amino acid	6.07±1.78 ^a	5.79±0.40 ^a	5.59±1.42 ^a	6.66±1.27 ^a
苦味氨基酸比例/% Proportion of bitter amino acid	63.86±4.19 ^a	64.07±5.17 ^a	50.61±4.19 ^b	46.08±4.17 ^b
甜味氨基酸比例/% Proportion of sweet amino acid	16.56±2.54 ^b	16.64±3.00 ^b	25.22±3.24 ^a	26.41±3.59 ^a
芳香类氨基酸比例/% Proportion of aromatic amino acid	52.96±4.31 ^a	53.32±5.82 ^a	34.21±5.49 ^b	28.62±6.58 ^b

表 4 不同海拔梯度毛竹春笋重金属含量和污染指数
Tab.4 Heavy metal content and pollution index of *Phyllostachys edulis* spring shoots under different altitudes

指标 Index	海拔梯度/m Altitude			
	250±50	550±50	750±50	1100±50
铅/(mg·kg ⁻¹) Lead	0.071±0.012 ^a	0.049±0.010 ^{ab}	0.028±0.003 ^b	0.058±0.028 ^a
锌/(mg·kg ⁻¹) Zinc	7.340±1.006 ^b	6.283±0.100 ^b	6.537±0.264 ^b	11.563±1.340 ^a
铜/(mg·kg ⁻¹) Copper	0.638±0.046 ^b	0.867±0.132 ^{ab}	0.841±0.208 ^{ab}	0.908±0.204 ^a
镉/(mg·kg ⁻¹) Cadmium	0.008±0.001 ^{bc}	0.007±0.001 ^c	0.013±0.001 ^a	0.011±0.003 ^{ab}
单项污染指数-铅 Single pollution index-lead	0.710±0.121 ^a	0.486±0.101 ^{ab}	0.278±0.027 ^b	0.676±0.165 ^a
单项污染指数-锌 Single pollution index-zinc	0.367±0.050 ^b	0.314±0.005 ^b	0.327±0.013 ^b	0.545±0.083 ^a
单项污染指数-铜 Single pollution index-copper	0.064±0.005 ^b	0.087±0.013 ^{ab}	0.084±0.021 ^{ab}	0.091±0.020 ^a
单项污染指数-镉 Single pollution index-cadmium	0.161±0.018 ^{bc}	0.135±0.013 ^c	0.252±0.002 ^a	0.217±0.067 ^{ab}
综合污染指数 Comprehensive pollution index	0.552±0.090 ^a	0.388±0.072 ^{ab}	0.285±0.007 ^b	0.549±0.128 ^a

3 结论与讨论

竹笋营养品质的海拔效应不仅存在种间差异,而且也受到地理差异的影响,与环境综合因子发生变

化密切相关。研究表明,苦竹(*Pleioblastus amarus*)笋蛋白质含量随海拔升高呈先降低后升高的趋势,淀粉、脂肪含量则相反^[22],而高节竹(*Phyllostachys prominens*)笋蛋白质、脂肪和淀粉含量随海拔变化差异不显著^[23]。本研究中,随海拔升高毛竹春笋脂肪、淀粉和可溶性糖含量均呈倒“V”型变化趋势,而蛋白质含量相反,但以前有研究^[24]认为,海拔对毛竹笋蛋白质、脂肪含量无显著影响,这说明不同地区竹笋品质的海拔效应存在差异,再者,该试验区中低海拔毛竹林受人为经营干扰影响较大,土壤较肥沃,有利于竹笋生长,而随海拔升高,光照增强,同时海拔550,750 m立竹密度较低,竹林可以得到充足的光照,增强毛竹光合作用,从而使竹笋积累较多的脂肪、淀粉和可溶性糖,而高海拔毛竹林生长环境的明显变化,低温风害加剧,一定程度上抑制了毛竹的光合作用,从而导致毛竹春笋脂肪、淀粉和可溶性糖含量明显降低。随海拔升高,检测到的18种氨基酸中大部分氨基酸含量和总氨基酸含量也呈倒“V”型变化趋势,人体必需氨基酸含量及其比例总体上呈降低趋势,这也与环境的光照强度和土壤肥力变化对作物氨基酸含量会产生明显的影响直接相关^[25-26]。

纤维素和木质素会影响竹笋的粗糙度,单宁是竹笋中主要的涩味来源,草酸和总酸不仅会影响竹笋食味品质,食用过多还会破坏人体的酸碱平衡,甚至会导致中毒。本研究表明,随海拔升高,毛竹春笋单宁、草酸和总酸含量总体上呈升高趋势,但不同海拔梯度单宁含量无显著差异,说明海拔越高,毛竹春笋酸涩味越高,适口性下降,这与作物单宁含量主要受光照强度影响^[27],光质会影响植物草酸含量^[28]等有关,海拔升高光照强度增强,光质也有差异,从而使试验区毛竹春笋单宁和草酸含量随海拔变化而变化;而且,高海拔环境条件相对恶劣,高含量的纤维类物质可对竹笋起到保护作用,以抵抗低温、高湿、强光的恶劣环境^[22],维持竹笋正常生长。海拔变化会造成竹笋氨基酸总量及其组分发生变化,从而对与毛竹笋风味关系密切的鲜味、甜味、苦味和芳香类氨基酸含量及其比例产生影响。本研究中,随海拔升高,苦味、芳香类氨基酸含量及其比例总体上呈降低趋势,而甜味氨基酸含量及其比例相反,鲜味氨基酸含量及其比例变化不明显,说明随海拔升高,毛竹春笋酸涩性降低,甜味升高,竹笋适口性有明显提高。

试验区是铅锌矿分布区,随海拔升高,毛竹春笋铅、锌含量及其单项污染指数和铅、锌、铜、镉综合污染指数均呈“V”型变化趋势,而铜、镉含量及其单项污染指数总体上呈上升趋势,这可能与不同海拔毛竹林土壤重金属含量存在差异有关。研究表明,毛竹林土壤重金属铅、锌、铜、镉含量随海拔升高均呈倒“V”型变化趋势,且毛竹笋铅、锌含量与土壤重金属铅锌含量呈明显负相关关系^[29];同时也可能与土壤有机质含量差异,使竹子根系对重金属吸附作用发生变化有关,而且土壤中镉对铜的吸收有促进作用,铜对锌有拮抗作用^[30],从而导致毛竹春笋中铜、镉含量随海拔升高均呈上升趋势,而锌含量呈“V”型变化趋势的重要原因。虽然海拔对试验区毛竹春笋重金属含量及其污染指数有较为明显的影响,但竹笋的铅、锌、铜、镉单项污染指数和综合污染指数均<1,说明试验区毛竹春笋重金属残留未超标,符合国家食品安全限量标准,属安全类竹笋。

综上,海拔对试验区毛竹春笋的营养品质、食味品质和基于重金属的安全品质有较明显的影响。过低的海拔不利于毛竹春笋营养品质的形成,而过高的海拔会提高毛竹春笋的酸涩味和粗糙度,降低甜味,对竹笋适口性产生负面影响,而且过低和过高海拔的毛竹林春笋重金属综合污染指数明显提高。综合分析,试验区海拔750 m的毛竹春笋综合品质较佳,是高品质毛竹笋培育的适宜海拔。

参考文献 References:

- [1] 郑蓉.产地绿竹笋品质及土壤养分的主成分与典型相关分析[J].浙江农林大学学报,2012,29(5):710-714.
ZHENG R.Canonical correlation and principal components analysis of different production areas of *Dendrocalamopsis oldhami* with quality indicators of bamboo shoots and its soil nutrients[J].Journal of Zhejiang A & F university, 2012, 29(5): 710-714.
- [2] 苏香玲,王振锡.海拔对毛竹生长和竹林结构的影响研究[J].林业资源管理,2016,44(4):96-100.
SU X L, WANG Z X.Effect of altitude on growth and forest structure of *Phyllostachys edulis*[J].Forest resources management, 2016, 44(4): 96-100.

- [3] 杨春雷,卜璐璐,孟荣钥,等.不同海拔高度对突尼斯软籽石榴果实品质的影响[J].中国果菜,2017,37(8):28-30.
YANG C L, BU L L, MENG R Y, et al. Effects of different altitudes on fruit quality of tunisian soft-seed pomegranate[J]. China fruit vegetable, 2017, 37(8): 28-30.
- [4] 罗文文,高琛稀,张东,等.不同海拔环境因子对富士苹果叶片和果实品质的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2243-2250.
LUO W W, GAO C X, ZHANG D, et al. Effects of environmental factors at different altitudes on leaves and fruit quality of Fuji apple[J]. Chinese journal of applied ecology, 2014, 25(8): 2243-2250.
- [5] 李苑,张艳华,黎祖尧,等.厚竹笋营养的地域变异及对生长环境的响应[J].安徽农业大学学报,2018,45(1):64-69.
LI Y, ZHANG Y H, LI Z Y, et al. Regional variations of nutrition in *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' bamboo shoots and its response to environmental factors[J]. Journal of Anhui agricultural university, 2018, 45(1): 64-69.
- [6] 王丹林,郭庆学,王小蓉,等.海拔对岷山大熊猫主食竹营养成分和氨基酸含量的影响[J].生态学报,2017,37(19):6440-6447.
WANG D L, GUO Q X, WANG X R, et al. Effects of different altitudes on the nutrient and amino acid contents of bamboo (*Fargesia denudata*), staple food of the giant panda, in Minshan, Sichuan, China[J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(19): 6440-6447.
- [7] 苟光前,丁雨龙,杨柳,等.寒竹属3个种竹笋营养成分的分析[J].中国蔬菜,2010,29(16):79-81.
GOU G Q, DING Y L, YANG L, et al. Nutrient analysis on bamboo shoots of three species in *Chimonobambusa* [J]. China vegetables, 2010, 29(16): 79-81.
- [8] ZHAO J C, WANG B, LI Q, et al. Analysis of soil degradation causes in *Phyllostachys edulis* forests with different mulching years[J]. Forests, 2018, 9(3): 149.
- [9] 林海萍,周淑红,沈振民.集约经营对毛竹笋品质的影响[J].江苏林业科技,2004,31(2):9-11.
LIN H P, ZHOU S H, SHEN Z M. The influence of intensive management on the bamboo shoot's quality[J]. Journal of Jiangsu forestry science & technology, 2004, 31(2): 9-11.
- [10] 王海霞,彭九生,曾庆南,等.江西毛竹笋营养品质区域分异性研究[J].竹子研究汇刊,2012,31(4):22-25.
WANG H X, PENG J S, ZENG Q N, et al. Regional variation of nutrition quality of moso bamboo shoots in Jiangxi [J]. Journal of bamboo research, 2012, 31(4): 22-25.
- [11] 邹跃国.海拔对毛竹林经济性状的影响研究[J].世界竹藤通讯,2010,8(2):11-15.
ZOU Y G. Influence of altitude on economic property of moso forest[J]. World bamboo and rattan, 2010, 8(2): 11-15.
- [12] 中华人民共和国卫生部.食品安全国家标准食品中蛋白质的测定:GB/T 5009.5—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard determination of protein in food: GB/T 5009.5—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [13] 中华人民共和国卫生部.食品中脂肪的测定:GB/T 5009.6—2003[S].北京:中国标准出版社.2003.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of fat in food: GB/T 5009.6—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [14] 中华人民共和国农业部.蔬菜及其制品中可溶性糖的测定:NY/T 1278—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of soluble sugar in vegetables and products Shaffer-somogyi: NY/T 1278—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [15] 俞乐,彭新湘,杨崇,等.反相高效液相色谱法测定植物组织及根分泌物中草酸[J].分析化学,2002,30(9):1119-1122.
YU L, PENG X X, YANG C, et al. Determination of oxalic acid in plant tissue and root exudate by reversed phase high performance liquid chromatography[J]. Chinese journal of analytical chemistry, 2002, 30(9): 1119-1122.
- [16] 中华人民共和国卫生部.食品中总酸的测定:GB/T 12456—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of total acid in food: GB/T 12456—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] 中华人民共和国农业部.水果、蔬菜及其制品中单宁含量的测定:NY/T 1600—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of tannin content in fruit, vegetable and derived product spectrophotometry method: NY/T 1600—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [18] 莫润宏,汤富彬,丁明,等.氨基酸分析仪法测定竹笋中游离氨基酸[J].化学通报,2012,75(12):1126-1131.

- MO R H, TANG F B, DING M, et al. Determination of free amino acids in bamboo shoot by amino acids analyzer[J]. Chemistry, 2012, 75(12): 1126-1131.
- [19] 王玉万, 徐文玉. 木质纤维素固体基质发酵物中半纤维素、纤维素和木素的定量分析程序[J]. 微生物学通报, 1987, 14(2): 35-38.
- WANG Y W, XU W Y. Quantitative analysis procedure of hemicellulose, cellulose and lignin in lignocellulose solid matrix fermentation[J]. Microbiology China, 1987, 14(2): 35-38.
- [20] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard determination of multicomponents in food: GB 5009.268—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [21] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 散生型笋用竹笋中有机农药残留[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1587-1591.
- GUO Z W, CHEN S L, YANG Q P, et al. Residual of organic pesticides in single axile type shoot-using bamboo shoot[J]. Chinese journal of ecology, 2008, 27(9): 1587-1591.
- [22] 郭子武, 杨丽婷, 林华, 等. 沙县苦竹笋外观、营养和食味品质变异的海拔效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 83-88.
- GUO Z W, YANG L T, LIN H, et al. Effect of altitude on the variation of appearance, nutrition, and taste for bamboo shoots of *Pleioblastus amarus* in Shaxian, Fujian Province[J]. Chinese journal of ecology, 2019, 38(1): 83-88.
- [23] 时俊帅, 陈双林, 郭子武, 等. 3个海拔梯度对高节竹笋品质的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 113-117.
- SHI J S, CHEN S L, GUO Z W, et al. Influence of altitudes on quality of *Phyllostachys prominens* shoot[J]. Forest research, 2018, 31(4): 113-117.
- [24] 陈双林. 海拔对毛竹林结构及生理生态学特性的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- CHEN S L. Effects of altitude on structure and physiological and ecological characteristics of moso bamboo forest[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [25] 李明良, 陈双林, 郭子武, 等. 覆土栽培对高节竹笋呈味氨基酸的影响[J]. 浙江林业科技, 2015, 35(2): 54-57.
- LI M L, CHEN S L, GUO Z W, et al. Influence of soil sealing on flavor amino acid in shoot from *Phyllostachys prominens* stand[J]. Journal of Zhejiang forestry science & technology, 2015, 35(2): 54-57.
- [26] 邱永华, 金爱武, 张四海, 等. 不同施肥方式对竹笋品质的影响[J]. 竹子学报, 2017, 36(1): 41-48.
- QIU Y H, JIN A W, ZHANG S H, et al. Effect of different fertilization methods on quality of bamboo shoots[J]. Journal of bamboo research, 2017, 36(1): 41-48.
- [27] 李雪蕾. 光照强度对三种竹笋不同部位苦涩味物质的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- LI X L. Effects of light intensity on bitter and astringent substances in different parts of three bamboo shoots[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [28] 齐连东, 刘世琦, 许莉, 等. 光质对菠菜草酸、单宁及硝酸盐积累效应的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 201-205.
- QI L D, LIU S Q, XU L, et al. Effects of light qualities on accumulation of oxalate, tannin and nitrate in spinach[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2007, 23(4): 201-205.
- [29] 徐森, 谷瑞, 陈双林, 等. 海拔对毛竹春笋重金属残留及其与土壤化学性状制约性关系的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 51-55.
- XU S, GU R, CHEN S L, et al. Effects of altitude on heavy metal residues in *Phyllostachys edulis* spring shoots and their restrictive relations with soil characters[J]. Journal of northeast forestry university, 2020, 48(11): 51-55.
- [30] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 289-292.
- ZU Y Q, LI Y, CHEN H Y, et al. Research on factors influencing concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn in vegetables[J]. Journal of agro-environment science, 2003, 22(3): 289-292.