

## 湖南毛竹笋及产地土壤重金属与健康风险研究

喻宁华<sup>1</sup>, 余佳荣<sup>1</sup>, 段俊敏<sup>1</sup>, 郑 琮<sup>1</sup>, 李梓铭<sup>1</sup>, 黄 丽<sup>1</sup>, 吴耀祥<sup>1</sup>, 范友华<sup>2\*</sup>

(1. 湖南省林产品质量检验检测中心, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省林业科学院, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 为了解湖南毛竹产区竹笋及产地土壤重金属的状况, 保障竹笋质量安全, 选择炎陵、湘乡、耒阳 3 个县市, 共采集毛竹笋样品及对应产地的土壤样品各 80 份, 分析土壤样品中重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu 含量和毛竹笋样品中相应重金属含量, 探讨土壤重金属含量与原产地毛竹笋中重金属含量之间的相关性, 并对毛竹笋中重金属进行健康风险评价。参照标准 GB 15618—2018, 对土壤重金属进行单因子污染指数、综合污染指数评价, 其次对竹笋中检出的重金属进行致癌和非致癌污染物健康风险评价。结果表明, 毛竹笋产地土壤样品中 Cd、As、Pb 均有不同程度的超标现象, 合格率分别为 67.5%、96.2%、77.5%, 3 个地区综合污染指数分别为 1.183、1.219、1.475, 表明毛竹笋产地土壤均有不同程度污染。毛竹笋样品中除 Hg 未检出外, Cd、As、Pb、Cr 4 种重金属均有检出, 合格率为 98.8%。毛竹笋中各重金属元素含量与对应产地土壤各重金属元素含量相关性系数较低, 其中仅炎陵毛竹笋重金属 As 含量与对应产地土壤的 As 含量呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 相关系数为 0.606。毛竹笋中检出的 Cd、As、Pb、Cr 4 种重金属总目标危险系数分别为 0.377、0.277、0.118。Cd 致癌风险分别为  $7.30 \times 10^{-6}$ 、 $8.45 \times 10^{-6}$ 、 $1.33 \times 10^{-5}$ 。综合得出, 可食部分毛竹笋对重金属积累较少, 且毛竹笋与产地土壤对应重金属元素含量无相关性, 通过食用毛竹笋摄入重金属的总目标危险系数低于 USEPA 推荐的最大可接受水平, 不会对暴露人群健康造成危害, Cd 致癌风险在可接受范围内。

**关键词:** 毛竹笋; 产地土壤; 重金属; 健康风险评价; 目标危险系数

**中图分类号:** S795

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-7461(2022)04-0166-07

### Evaluation of Health Risk of Heavy Metals in *Phyllostachys edulis* Shoot and Planting Soil in Hunan Province

YU Ning-hua<sup>1</sup>, SHE Jia-rong<sup>1</sup>, DUAN Jun-min<sup>1</sup>, ZHENG Qiong<sup>1</sup>, LI Zi-ming<sup>1</sup>, HUANG Li<sup>1</sup>,  
WU Yao-xiang<sup>1</sup>, FAN You-hua<sup>2\*</sup>

(1. Hunan Quality Inspection and Testing Center for Forestry Products, Changsha 410004, Hunan, China;

2. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** To assess the correlation between the heavy metals in *Phyllostachys edulis* shoot (an edible product in the market) and the soil in Hunan Province for the purpose of guarantee the quality and safety of the shoot, a quantitative analysis of Cd, Hg, As, Pb and Cr was conducted in 80 shoot samples and 80 soil samples collected from Yanling, Xiangxiang and Leiyang. Both the single factor and comprehensive pollution index of heavy metals in soil were assessed based on China national standard "GB 15618—2018". And then carcinogenic and non-carcinogenic pollutants were evaluated to discover the health risk of the heavy metals in *P. edulis* shoot. The findings showed that the pass rates of Cd, As, and Pb contents in the sampled soil which met the standard were 67.5%, 96.2% and 77.5% respectively. The comprehensive pollu-

收稿日期: 2021-07-23 修回日期: 2021-09-23

基金项目: 湖南省林业科技创新专项(XLK201916)。

第一作者: 喻宁华, 高级工程师, 硕士研究生。研究方向: 林产品质量安全研究工作。E-mail: 782349696@qq.com

\* 通信作者: 范友华, 博士, 研究员。研究方向: 林产品加工利用研究。E-mail: yh\_fan@163.com

tion indexes of the three regions were 1.183, 1.219 and 1.475, respectively. The results also showed that the soil were polluted to different degrees. Hg wasn't detected in the sampled shoot, but such heavy metals as Cd, As, Pb and Cr were detected. And only one sample had excessive amount of Pb, and 98.8% of shoot met the standard in terms of Pb. Therefore, the correlation coefficients between the content of every heavy metal in *P. edulis* shoot and the soil were low. Only As in shoot was positively correlated with that in the soil of the corresponding producing area ( $P < 0.01$ ), and the correlation coefficient was 0.606. The total target hazard quotients of Cd, As, Pb and Cr in *P. edulis* shoot samples were 0.377, 0.277 and 0.118, respectively. The quotients of carcinogenic hazard of Cd in Yanling, Xiangxiang and Leiyang were  $7.30 \times 10^{-6}$ ,  $8.45 \times 10^{-6}$  and  $1.33 \times 10^{-5}$ , respectively. To sum up, the accumulation rate of all five heavy metals in edible parts of *P. edulis* shoot was in low level. There was no correlation between the content of heavy metals studied in *P. edulis* shoot and the soil. The total target hazard quotient of five heavy metals through consumption of *P. edulis* shoot was lower than the maximum level recommended by USEPA. Therefore, the intake of *P. edulis* shoot will not bring risk to the health of exposed adult population. The carcinogenic hazard of cadmium was acceptable.

**Key words:** *Phyllostachys edulis* shoot; planting soil; heavy metals; health risk assessment; target hazard quotient

竹笋是中国传统的山珍之一,被誉为“蔬食第一品”。根据《全国竹产业发展规划(2013—2020年)》预测,竹笋及其产品的国内外需求量将会以每年16%的速度递增<sup>[1]</sup>。毛竹(*Phyllostachys edulis*)依靠鞭根吸收土壤中的水分和养料及部分重金属元素<sup>[2]</sup>。重金属元素是土壤的重要组成部分,重金属污染通过富集作用到植物可食用部分,从而对人体健康造成严重危害。根据重金属可能产生的一系列危害,美国环保署(USEPA)将As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn列为优先控制污染物<sup>[3-4]</sup>。

湖南素有有色金属之乡的美誉,矿产资源丰富。矿产的开采等导致重金属通过“土壤-植物-食物”途径进入人体,严重影响了当地居民的身体健康<sup>[5-7]</sup>。由于产地环境中土壤及竹笋可食部分中重金属的积累将直接影响其产品质量以及食用人群的健康风险,因此对竹笋中重金属等污染物及来源和防控的研究也越来越重视,各级相关部门也加大力度对竹笋质量安全进行监测与控制。近年来各级政府部门对竹笋产区土壤重金属及竹笋重金属污染情况进行全面监测。

重金属污染健康风险评估的方法中定量模型在世界健康风险评估中被广泛应用,其中以美国国家环保署(USEPA)提出的人体健康风险评估模型应用最多<sup>[8]</sup>,其中常用的是膳食暴露评估模型。目标危险系数(Target hazard quotient THQ)和目标致癌风险(TR)是由其推荐采用的健康风险评价模型,THQ超过安全基准值1.0,说明该污染物对人体具有潜在健康风险;TR值与美国环保署(USEPA)推荐的可接受风险值( $10^{-6} \sim 10^{-4}$ )进行对

比<sup>[9]</sup>,从而对居民(成人)长期摄入竹笋中Cd的致癌概率进行评估。国内利用该模型对竹笋重金属污染研究较少<sup>[10-12]</sup>。

本研究选择湖南主要毛竹笋产区,通过取样分析该地土壤中6种重金属Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu含量和毛竹笋中Cd、Hg、As、Pb、Cr含量的状况,对毛竹林地土壤与竹笋中对应重金属元素含量之间的相关性进行分析,并对该区域竹笋可食部分重金属进行健康风险评价,为确保人体健康安全及生态环境资源的合理有效利用提供科学依据,确保食用竹笋的优质安全。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

原子吸收分光光度计(岛津 AA-6300C,日本),原子荧光分光光度计(吉天 AFS-933,中国)。盐酸、硝酸、氢氟酸和高氯酸,均为优级纯。

### 1.2 样品的采集

选择湖南省炎陵、湘乡、耒阳3个毛竹笋产区,进行毛竹笋产地土壤及其重金属检测,炎陵县区抽样毛竹笋及对应产地土样各30个,范围包括沔渡镇、十都镇、策源乡、船形乡、鹿原镇、下村乡、垅溪乡和水口镇8个乡镇;湘乡市区抽样毛竹笋及对应产地土壤各30个,范围包括于塘镇、中沙镇、梅桥镇、山枣镇、白田镇、壶天镇、金石镇、金数乡、栗山镇、龙洞镇、毛田镇、棋梓镇、谭市镇、育塅乡、泉塘镇、翻江镇、月山镇和东郊乡18个乡镇;耒阳县区抽样毛竹笋及对应产地土壤各20个,范围集中在黄市镇、大义镇、南阳镇、亮源乡。采样时间均为4月份,土壤

采集按 HJ/T166—2004《土壤环境监测技术规范》规定的执行,采集深度 0~20 cm 土壤,每个采样区的土壤样品为一个混合样,混合样采集点数不少于 5 个,混合后的土壤样品重量不少于 1 kg,采用干净无污染的塑料袋装样,多个样点土样充分混匀后包装。毛竹笋采集参照 LY/T 2800—2017《经济林产品质量安全监测技术规程》规定执行,选择随机取样法,取 3 株,竹笋在竹鞭处切断,整株取出作为一个完整样品,剥壳后笋肉至少 1.5 kg。

### 1.3 样品处理与分析

1.3.1 毛竹笋样品处理 剥去笋壳取可食部分,粉碎后冷冻备用。竹笋样品中重金属含量按 GB 5009.268—2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定方法执行。用蒜粉生物成分分析标准物质 GBW—10022 (GSB—13)作质控样。

1.3.2 土壤样品处理 样品自然风干,采用四分法取样,用橡胶锤压碎后依次过 10 目、100 目尼龙筛,保存备用。按 GB/T 17141—1997、HJ 491—2019、GB/T 22105.1—2008、GB/T 22105.2—2008 等标准进行测定。用土壤成分分析标准物质 GBW07404、GBW07405、GBW07453 (GSS-4、GSS-5、GSS-24)作质量控制对照样。

### 1.4 重金属污染评价方法

参照 GB 15618—2018 标准,采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对产地土壤重金属污染进行环境质量评价<sup>[13-18]</sup>。单因子污染指数法分级标准和内梅罗综合污染指数法分级标准见表 3。计算公式分别为

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: $P_i$  为土壤中  $i$  污染指数, $C_i$  为污染物的含量, $S_i$  为土壤的  $i$  污染物的风险筛选值(mg/kg)。

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

式中: $P_{\text{max}}$  为土壤中重金属污染指数最大值; $P_{\text{ave}}$  为土壤中各污染指数的平均值。

### 1.5 毛竹笋重金属健康风险评估

采用由美国环保署 (USEPA) 推荐的健康风险评估模型,以 THQ 表征由竹笋摄入引起的重金属暴露风险指数<sup>[19]</sup>,其计算公式如式(3)、式(4)所示。化学物质的健康风险分为非致癌风险和致癌风险,Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu 6 种重金属经口服暴露产生非致癌风险;As 和 Cd 经口服暴露还能产生致癌风险。非致癌风险计算结果  $THQ \geq 1$  时,表明污染物会导致人体健康风险,否则影响不明显。不考虑污染物之间的相互作用的前提下,将每种污染物产生的非致癌风险相加,得到总目标危险系数(TTHQ)

,计算公式如(4)所示。同样,当  $TTHQ \geq 1$  时,表示非致癌风险较大。致癌风险在  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  为可接受范围, $>10^{-4}$  不接受<sup>[20]</sup>。

$$\text{非致癌风险 } T_{HQ} = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times c}{R_{ID} \times B_W \times A_{Tn}} \quad (3)$$

$$T_{THQ} = \sum T_{HQ} \quad (4)$$

$$\text{致癌风险 } H_Q = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times c}{B_W \times A_{Tn}} \times S_F \quad (5)$$

式中: $E_F$  为暴露频率(365 d/a), $E_D$  为暴露年限,对非致癌物为(30 a),对致癌物即平均寿命(70 a), $F_{IR}$  表示竹笋的日摄取速率(kg/d), $c$  为竹笋中重金属含量(mg/kg), $R_{ID}$  为参考剂量 [mg/(kg·d)], $B_W$  为人平均体重,按人均 60 kg 计算, $A_{Tn}$  为平均接触时间( $E_D \times E_F$ )<sup>[22]</sup>。 $S_F$  为致癌斜率系数[mg/(kg·d)],指个体终生暴露于单位剂量某一致癌物后发生癌症概率的 95%上限估计值。

### 1.6 数据的分析和统计

采用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行统计分析,利用单因素方差分析对不同产地土壤重金属含量及毛竹笋重金属含量之间的差异进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤样品的重金属含量

所采样点的土壤样品 pH 处于 6.5 以下,整体呈酸性。表 1 为所采土壤样品的 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu 重金属含量。依据 GB 15618—2018 标准,从表 1 可知,3 个采样地土壤样品中 Hg、Cr、Cu 含量总体达标率 100%,而其他 3 种重金属含量因地区差异性较大,炎陵采样点土壤 Cd、As、Pb 合格率分别为 60%、90%、70%,湘乡采样点土壤 Pb 合格率为 70%,而耒阳采样点土壤 Cd 合格率仅为 30%。3 个地区土壤总合格率为 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu 分别为 67.5%、100%、96.2%、77.5%、100%、100%。另外从统计结果看,重金属 Cd 在 3 个县市分布均有显著性差异,而 Hg 无明显差异;耒阳地区的 As、Pb 和 Cr 与炎陵、湘乡 2 地区有显著性差异,而炎陵地区土壤中的 Cu 与其他 2 地区有显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2 毛竹笋样品的重金属含量

所采毛竹笋样品的 Cd、Hg、As、Pb、Cr 含量情况如表 2 所示。采用 GB 2762—2017“普通新鲜蔬菜”中的限量值作参考值,因 Cu 元素没有限量标准,所以没有检测其含量。除炎陵地区 Pb 有 1 个检出不合格外,其他含量均合格。且土壤 Cd 污染相对严重的耒阳,毛竹笋 Cd 均合格。3 个地区毛竹笋中 Hg、Pb、Cr 含量无显著差异,耒阳 Cd、As 与炎陵、湘乡有显著差异( $P < 0.05$ )。

2.3 土壤重金属污染水平评价

采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法计算,各地区土壤中重金属污染指数如表 4 所示。根据表 3 土壤污染程度分级标准,所有产地土壤污染程度均为轻污染或以下。所监测的 80 批次土壤样品中,重金属 Hg、Cr、Cu 单项污染指数  $P_i$  均小于 0.7,污染程度属于安全,耒阳地区的重金属 Cd、As 单项污染指数  $P_i$  平均值大于 1,污染程度属于

轻度污染,炎陵和湘乡 2 地区的 Pb 单项污染指数  $P_i$  平均值均大于 1,属于轻度污染<sup>[22]</sup>。从单项污染指数来看,3 个地区中,炎陵、湘乡 2 地区的 Pb 污染指数最高,而耒阳地区的 Cd 污染指数最高;从综合污染指数来看,炎陵、湘乡、耒阳 3 个县市土壤均有轻度污染,而污染由大到小为耒阳地区、湘乡地区、炎陵地区,无中污染或重污染情况。

表 1 毛竹笋土壤重金属含量

Table 1 Heavy metal content in soil samples of *Phyllostachys edulis* shoot

采样地区		Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu
炎陵地区	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.241±0.126 <sup>b</sup>	0.144±0.105 <sup>a</sup>	21.2±13.6 <sup>b</sup>	61.5±15.1 <sup>a</sup>	42.7±20.6 <sup>b</sup>	22.1±11.7 <sup>b</sup>
	范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.036 0~0.429	0.026 0~0.524	8.25~59.3	32.3~85.0	9.14~81.6	6.59~59.8
	合格率(%)	60	100	90	70	100	100
湘乡地区	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.154±0.090 2 <sup>c</sup>	0.108±0.045 6 <sup>a</sup>	11.8±2.46 <sup>b</sup>	64.6±12.7 <sup>a</sup>	41.8±12.3 <sup>b</sup>	29.9±5.10 <sup>a</sup>
	范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.047 8~0.410	0.049 2~0.235	7.40~17.4	27.5~79.6	26.2~73.5	15.9~34.3
	合格率(%)	100	100	100	70	100	100
耒阳地区	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.500±0.188 <sup>a</sup>	0.130±0.028 0 <sup>a</sup>	51.5±32.0 <sup>a</sup>	40.4±8.36 <sup>b</sup>	74.2±15.5 <sup>a</sup>	28.6±7.01 <sup>a</sup>
	范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.230~0.840	0.080 0~0.160	16.0~122	28.0~51.2	56.0~100.0	20.0~40.1
	合格率(%)	30	100	100	100	100	100
	总合格率(%)	67.5	100	96.2	77.5	100	100

注:同列数值后不同字母表示差异达 5%显著水平( $P<0.05$ )。下表同。

表 2 毛竹笋重金属含量

Table 2 Eavy metal content in *P. edulis* shoot sample

采样地区		Cd	Hg	As	Pb	Cr
炎陵地区	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.014 5±0.010 0 <sup>b</sup>	未检出	0.000 8±0.001 2 <sup>b</sup>	0.038 8±0.064 6 <sup>a</sup>	0.093 7±0.063 4 <sup>a</sup>
	范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.002 5~0.038 8	未检出	0~0.003 4	0~0.294 0	0~0.207 0
	合格率(%)	100	100	100	97	100
湘乡地区	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.016 8±0.008 1 <sup>b</sup>	未检出	0.001 7±0.001 8 <sup>b</sup>	0.041 8±0.024 6 <sup>a</sup>	0.127 0±0.148 4 <sup>a</sup>
	范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.004 0~0.031 6	未检出	0~0.004 9	0.001 0~0.094 8	0.013 6~0.657 0
	合格率(%)	100	100	100	100	100
耒阳地区	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.026 5±0.011 0 <sup>a</sup>	未检出	0.012 1±0.010 0 <sup>a</sup>	0.034 1±0.038 0 <sup>a</sup>	0.070 5±0.052 0 <sup>a</sup>
	范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.006 5~0.045 2	未检出	0.004 4~0.037 3	0~0.100 0	0.018 9~0.154 0
	合格率(%)	100	100	100	100	100

表 3 土壤重金属污染指数与污染程度的对应关系

Table 3 Relations between pollution index and pollution level of heavy metal in soil

污染指数( $P$ )	$P\leqslant 0.7$	$0.7<P\leqslant 1.0$	$1.0<P\leqslant 2.0$	$2.0<P\leqslant 3.0$	$P>3.0$
土壤污染程度	安全	警戒值	轻度污染	中度污染	重污染

表 4 毛竹笋产地土壤重金属污染指数

Table 4 Heavy metal pollution index in planting soil samples of *P. edulis* shoot

项目	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	$P_{\text{综}}$
炎陵	0.784±0.422	0.110±0.081	0.530±0.341	1.538±0.377	0.285±0.137	0.442±0.234	1.183±0.252
湘乡	0.514±0.300	0.0834±0.035	0.295±0.061	1.615±0.317	0.279±0.082	0.597±0.102	1.219±0.217
耒阳	1.670±0.625	0.100±0.022	1.289±0.800	0.579±0.120	0.496±0.104	0.570±0.140	1.475±0.499
平均值	0.882±0.630	0.098±0.057	0.588±0.548	1.377±0.510	0.325±0.139	0.530±0.185	1.256±0.318

2.4 毛竹笋重金属健康风险评价

根据毛竹笋样品中重金属的平均含量和其他相关参数,由式(3)计算得到长期食用毛竹笋的

THQ。当考虑不同重金属的同时作用时,炎陵、湘乡、耒阳 3 个地区检出的 4 种重金属 TTHQ 高低顺序为耒阳>炎陵>湘乡,分别为 0.377、0.277 和



0.118。如图 2 所示,炎陵、耒阳 2 地区对总目标危险系数贡献最大的是重金属 Cr,其贡献率分别为 69.7%、38.5%;而湘乡地区贡献最大的是 Cd,贡献率为 44.1%。3 个地区重金属非致癌风险 THQ 及 TTHQ 均小于 1,说明这 4 种检出的重金属对暴露成人群均没有明显的健康风险<sup>[23]</sup>。Cd 致癌风险分别为  $7.30 \times 10^{-6}$ 、 $8.45 \times 10^{-6}$ 、 $1.33 \times 10^{-5}$ ,也均在可接受范围内(表 6)。

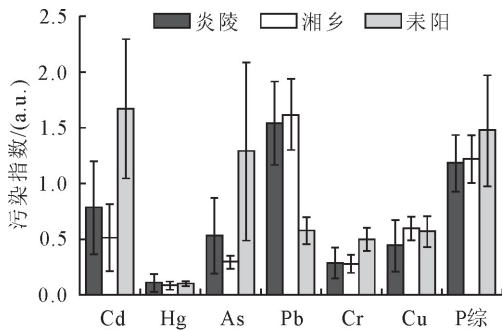


图 1 毛竹笋各产地土壤不同重金属的单污染指数及综合污染指数

Fig.1 The single pollution index of each heavy metal and comprehensive pollution index in planting soil of *P. edulis* shoot

表 5 暴露量评价公式计算参数

Table 5 Parameters for exposure evaluation formula		
每日摄入量(IR)	185.4	g/d
人群暴露频率(EF)	365	d
暴露年限(ED)	30	a
非致癌暴露时间(AT)	10950	d
平均体重	60	kg

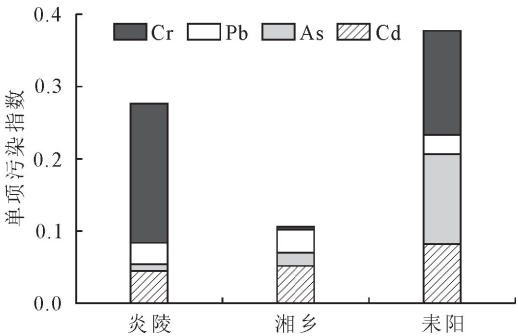


图 2 不同重金属对总目标危险系数的贡献

Fig.2 Contribution of each heavy metal to TTHQ

2.5 产地土壤重金属对应毛竹笋相应重金属 Pearson 相关性结果

应用 Pearson 相关性分析可以看出,不同地区的毛竹笋与产地土壤重金属元素含量表现出一定的相关性(表 7):炎陵毛竹笋重金属 As 含量与对应

表 6 毛竹笋重金属暴露量及非致癌风险系数

Table 6 The exposure levels and noncarcinogenic hazardquotient of heavy metal in *P. edulis* shoot

采样地区		Cd	As	Pb	Cr
炎陵地区	参考暴露剂量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	0.001	0.0003	0.004	0.0015
	重金属日暴露量(CDI)	$0.045 \times 10^{-3}$	$0.003 \times 10^{-3}$	$0.120 \times 10^{-3}$	$0.290 \times 10^{-3}$
	目标风险系数(THQ)	0.045	0.009	0.030	0.193
	总目标风险系数(TTHQ)	0.277			
湘乡地区	重金属日暴露量(CDI)	$0.052 \times 10^{-3}$	$0.005 \times 10^{-3}$	$0.129 \times 10^{-3}$	$0.005 \times 10^{-3}$
	目标风险系数(THQ)	0.052	0.018 <sup>3</sup>	0.032	0.004
	总目标风险系数(TTHQ)	0.118			
耒阳地区	重金属日暴露量(CDI)	$0.082 \times 10^{-3}$	$0.037 \times 10^{-3}$	$0.105 \times 10^{-3}$	$0.218 \times 10^{-3}$
	目标风险系数(THQ)	0.082	0.124 <sup>3</sup>	0.026	0.145
	总目标风险系数(TTHQ)	0.377			

表 7 毛竹笋 Cd 重金属致癌风险系数

Table 7 The carcinogenic hazardquotient of heavy metal in *P. edulis* shoot sample

风险系数	炎陵地区	湘乡地区	耒阳地区
致癌系数/( $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ )		0.38	
重金属日暴露量(CDI)	0.019	0.022	0.035
致癌风险系数	$7.30 \times 10^{-6}$	$8.45 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-5}$

产地土壤的 As 含量呈极显著( $P < 0.01$ )正相关,相关系数为 0.606;湘乡的毛竹笋重金属 Cr 含量与对应产地土壤的 Cr 含量呈显著( $P < 0.05$ )正相关,而其他地区毛竹笋中所测重金属元素含量与产地土壤

对应元素的含量呈不显著正相关或负相关。

表 8 土壤重金属元素含量与毛竹笋对应重金属元素含量的 Pearson 相关性分析

Table 8 Pearson correlation analysis on content of heavy metal elements in planting soil and *P. edulis* shoot

元素	不同地区毛竹笋与产地土壤对应元素 的各相关系数		
	炎陵地区	湘乡地区	耒阳地区
Cd	0.057	0.271	-0.127
As	0.606 **	0.174	0.310
Pb	0.242	-0.073	-0.730
Cr	-0.009	0.477 *	-0.260

注: \*\* 相关性在 0.01 水平, \* 相关性在 0.05 水平。

### 3 结论与讨论

对湖南炎陵、湘乡和耒阳3个毛竹笋产区产地土壤及毛竹笋中重金属Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu含量进行检测得出,1)从单项污染指数来看,重金属对土壤的污染程度依次为 $Pb > Cd > As > Cu > Cr > Hg$ 。2)所监测的80个毛竹笋样品中除Pb合格率为98.8%,其余重金属Cd、Hg、As、Cr含量均合格,所监测样品中重金属含量与产地土壤重金属含量无相关性。3)根据目标危险系数及致癌风险数据,3个地区毛竹笋中的Pb、As、Cu、Cr、Hg5种重金属对暴露成人人群均没有明显的健康风险。重金属Cd的致癌风险在可接受范围内。

从土壤重金属结果数据分析来看,湖南土壤重金属中Cd、Pb污染较为严重,这主要来自有色金属的采掘和冶炼两大行业的工业排放。不同地区产地土壤各重金属含量有显著差异性,但毛竹笋中各重金属含量差异不显著。从土壤与毛竹笋对应重金属元素含量分析,重金属污染地区土壤中重金属含量与竹笋中相应元素含量没有特定的对应关系,且不同地区同一种重金属元素的相关系数各不相同。这些都表明毛竹笋中的重金属元素含量并不直接受其土壤中重金属元素含量的影响。推测这种情况可能与毛竹本身生理特性的不同有关<sup>[24]</sup>。另外毛竹笋采样季节为春季,毛竹笋生长迅速且含水率高达90%,可食部分对重金属积累量较小,因此产地土壤与毛竹笋对应重金属元素相关性不显著。其次,即使是产地土壤重金属符合要求的情况下,也还存在有重金属含量超标的现象。

不同地区毛竹笋健康风险较大的重金属元素也不同,可能还跟当地环境中大气、水源等其他环境因素有关,也可能与不同竹笋品种的富集特性相关。毛竹笋中重金属健康风险较低,但多种食物的摄入导致总目标危险系数超过1。关于这方面的研究,还需后期继续跟踪。

#### 参考文献:

- [1] 吴良如. 竹笋——大健康蓬勃发展背景下的未来食品[J]. 国土绿化, 2019(10): 23-25.
- [2] 周紫球, 邱永华, 周建革, 等. 毛竹笋对土壤重金属吸收能力初探[J]. 浙江林业科技, 2013, 33(6): 61-63.  
ZHOU Z Q, QIU Y H, ZHOU J G, *et al.* Preliminary report on absorbing capacity of soil heavy metal by *Phyllostachys pubescens* shoot[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2013, 33(6): 61-63. (in Chinese)
- [3] CHENG S P. Heavy metal pollution in China: origin, pattern and control [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10(3): 192-198.
- [4] CHAI L, WANG Y H, WANG X, *et al.* Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China [J/OL]. Ecological Indicators, 2021, 125, doi:10.1016/j.ecolind.2021.107507.
- [5] ZHUANG P, LI N Y, LI Z A. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31: 707-715.
- [6] HU W Y, HUANG B, SHI X Z, *et al.* Accumulation and health risk of heavy metals in a plot-scale vegetable production system in a peri-urban vegetable farm near Nanjing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 98: 303-309.
- [7] 杨晶, 赵云利, 甄泉, 等. 某污灌区土壤与蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2014(2): 234-238.  
YANG J, ZHAO Y L, ZHEN Q, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of soil and vegetable in a sewage-irrigated area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014(2): 234-238. (in Chinese)
- [8] 刘蕊, 张辉, 勾昕, 等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1239-1244.  
LIU R, ZHANG H, GOU X, *et al.* Approaches of health risk assessment for heavy metals applied in China and advance in exposure assessment models: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1239-1244. (in Chinese)
- [9] 叶嘉敏, 余厚平, 简敏菲, 等. 鄱阳湖流域农田重金属污染的生态风险评估[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2016, 40(4): 429-436.  
YE J M, YU H P, JIAN M F, *et al.* The ecological risk assessment of the heavy metals pollution on the typical wetland and farmland of poyang lake [J]. Jiangxi Normal University: Natural Science Edition, 2016, 40(4): 429-436. (in Chinese)
- [10] 任传义, 程军勇, 张延平, 等. 竹笋地土壤重金属污染潜在生态风险及食用笋健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 855-862.  
REN C Y, CHENG J Y, ZHANG Y P, *et al.* Assessment of heavy metals potential ecological hazards of soil and health risk of bamboo shoots [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(5): 855-862. (in Chinese)
- [11] 吴志伟, 朱芩, 杨萍. 石灰氮对早竹林土壤重金属污染潜在生态风险及竹笋健康风险的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(9): 2103-2111.  
WU Z W, ZHU Q, YANG P. Effects of lime nitrogen on potential ecological risk of heavy metal pollution in *Phyllostachys violascens* stands soil and health risk of bamboo shoot [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(9): 2103-2111. (in Chinese)
- [12] 顾捷, 黄丽英, 梅光明, 等. 乐清湾北部及嵊泗区域养殖贝类肌肉中镉含量调查及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8276-8283.  
GU J, HUANG L Y, MEI G M, *et al.* Investigation and health risk assessment of cadmium in muscle from cultured shellfish in Northern Yueqing Bay and Shengsi [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(22): 8276-8283. (in Chinese)
- [13] 中国环境监测总站, 南京市环境监测中心站. HJ/T 166-

- 2004,土壤环境监测技术规范[S].北京:中国环境出版社,2004:20-22.
- [14] 崔旭,葛元英,张小红.晋中市部分蔬菜中重金属含量及其健康风险[J].中国农学通报,2009,25(21):335-338.  
CUI X,GE Y Y,ZHANG X H. Contents of heavy metals in Some vegetables and their potential risks to human health in Jinzhong city[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(21):335-338. (in Chinese)
- [15] 叶文虎,栾胜基.环境质量评价学[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [16] 刘二雄,耿荣,耿增超.汉城湖绿化区土壤重金属污染评价[J].西北林学院学报,2016,31(4):284-290.  
LIY E X,GENG R,GENG Z C. Pollution assessment on soil heavy metals in green belts of lake Hancheng[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 31(4): 284-290. (in Chinese)
- [17] 刘子龙,鲁建江,张广军.石河子葡萄主产区土壤重金属含量分析及污染评价[J].西北林学院学报,2010,25(4):14-18.  
LIU Z L,LU J J,ZHANG G J. Evaluation and contents analysis of heavy metals in orchard soil of the major grape production area of Shihezi[J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25(4):14-18. (in Chinese)
- [18] 刘德良,王开峰,杨期和,等.粤东北银锦矿尾矿区周边土壤重金属污染评价[J].西北林学院学报,2015,30(6):65-70.  
LIU D L,WANG K F,YANG Q H, *et al.* Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in northeast Guangdong Ag-Sb deposit[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):65-70. (in Chinese)
- [19] 郑娜,王起超,郑冬梅.基于THQ的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J].环境科学学报,2007,27(4):672-678.  
ZHENG N,WANG Q C,ZHENG D M. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2007,27(4):672-678. (in Chinese)
- [20] 朱美霖,朱新忠,冯宁川.重金属在甘草中的健康风险评估及限量浓度测定[J].中成药,2016,38(8):1771-1776.  
ZHU M L,ZHU X Z,FENG N C. Evaluation of health risks and determination of limited concentrations of heavy metals in Glycyrrhizae Radix et Rhizoma[J]. Chinese Traditional Patent Medicine,2016,38(8):1771-1776. (in Chinese)
- [21] 贾超华,颜新培,龚昕,等.镉超标耕地蔬菜重金属污染调查与健康风险评估[J].中国农学通报,2016,32(5):106-112.  
JIA C H,YAN X P,GONG X, *et al.* Heavy-metal pollution investigation and health risk assessment for vegetables in cadmium exceeded cultivated land [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(5):106-112. (in Chinese)
- [22] 李怡欣,谢桂军,李腊梅,等.广东麻竹笋及产地土壤重金属污染与风险评估[J].林业与环境科学,2020,36(6):103-109.  
LI Y X,XIE G J,LI L M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and risks of bamboo (*Dendrocalamus latiflorus*) shoots and soils in Guangdong Province[J]. Forestry and Environmental Science,2020,36(6):103-109. (in Chinese)
- [23] 王佳,刘斌,肖柏林,等.重庆城区市售蔬菜重金属污染评价与健康风险评估[J].生态环境学报,2018,27(5):942-949.  
WANG J,LIU B,XIAO B, *et al.* Evaluation and health risk assessment of heavy metals pollution in vegetables sold in markets in Chongqing[J]. Ecology and Environmental Sciences,2018,27(5):942-949. (in Chinese)
- [24] 李坛川,周智峰,潘建华,等.土壤重金属对毛竹冬笋中重金属含量的影响[J].林业科技,2014,39(6):25-28.  
LI T C,ZHOU Z F,PAN J H, *et al.* The effect of soil heavy metals on heavy metals concentrations of winter bamboo shoots in *Phyllostachys pubescens* [J]. Forestry Science & Technology,2014,39(6):25-28. (in Chinese)