

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价[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 855–862.

REN Chuan-yi, CHENG Jun-yong, ZHANG Yan-ping, 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.

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价

任传义¹, 程军勇², 张延平¹, 汤富彬^{1*}, 倪张林¹, 屈明华¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 2. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430079)

摘要:为研究竹笋地土壤重金属污染潜在生态风险及竹笋可食部分重金属健康风险, 采用石墨炉原子吸收法、原子荧光光谱法和电感耦合等离子体质谱法测定了浙江省和江西省 8 个竹笋生产基地的土壤和竹笋中 5 种重金属(Pb、Cr、Cd、As、Cu)含量。结果显示: 生产基地土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Cu 平均含量分别为 35.5、47.5、0.22、8.5、25.5 mg·kg⁻¹, 其中 Pb 和 Cd 含量最高分别达到 54.2、0.58 mg·kg⁻¹, 超出食用林产品产地环境通用要求(LY/T 1678—2014)的限值; 竹笋中重金属 Pb、Cr、Cd、As、Cu 含量范围分别为 6.0~39.7、9.0~105.4、0.70~19.9、1.4~4.6、322.0~1 648.9 μg·kg⁻¹, 均未超出标准森林食品质量安全通则(LY/T 1777—2008)和食品安全国家标准食品中污染物限量(GB 2762—2012)的限值。竹笋生产基地土壤中 5 种重金属的综合潜在生态危害程度(RI)较低, 虽然江西省花桥镇和绕二镇 Cd 单项潜在生态危害系数(E)处于中等潜在生态危害程度, 但竹笋可食部分对重金属积累较少, 通过竹笋摄入 5 种重金属健康危害指数(Hazard Index, HI)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。

关键词:竹笋; 土壤; 重金属; 质量安全; 潜在生态风险; 健康风险评价

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)05-0855-08 doi:10.11654/jaes.2016-1501

Assessment of heavy metals potential ecological hazards of soil and health risk of bamboo shoots

REN Chuan-yi¹, CHENG Jun-yong², ZHANG Yan-ping¹, TANG Fu-bin^{1*}, NI Zhang-lin¹, QU Ming-hua¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430079, China)

Abstract: To investigate the potential ecological hazards of soil and the health risk of bamboo shoots consumption, the contents of five kinds of heavy metals (Pb, Cr, Cd, As and Cu) in moso bamboo shoots and soil collected from eight producing areas in Zhejiang and Jiangxi Province were measured by atomic absorption spectrometry, atomic fluorescence spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. The result showed that average contents of Pb, Cr, Cd, As and Cu in soil were 35.5, 47.5, 0.22, 8.5 mg·kg⁻¹, and 25.5 mg·kg⁻¹, respectively. The highest content of Cd and Pb reached 54.2 mg·kg⁻¹ and 0.58 mg·kg⁻¹, which exceeded the limit value of LY/T 1678—2014. The content of Pb, Cr, Cd, As and Cu in all bamboo shoots were within the ranges of 6.0~39.7, 9.0~105.4, 0.70~19.9, 1.4~4.6 μg·kg⁻¹ and 322.0~1 648.9 μg·kg⁻¹ respectively, which were lower than the threshold values of LY/T 1777—2008 and GB 2762—2012. The individual potential ecological risk index of Cd was in the medium level of the risk, while the comprehensive potential ecological risk index of five kinds of heavy metals was in low level. The accumulation rate of all five kinds of heavy metals in edible part of bamboo shoots was in low level. The hazard index (HI) of five kinds of heavy metals through consumption of bamboo shoots ranged from 0.059 to 0.57, which were lower than the maximum allowance levels recommended by USEPA. Therefore, the intake of moso bamboo shoots would not bring risks to residents.

Keywords: bamboo shoots; soil; heavy metals; quality safety; potential ecological risk; health risk assessment

收稿日期: 2016-11-25

作者简介: 任传义(1991—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为林产品质量安全。E-mail: cpcyibo@163.com

* 通信作者: 汤富彬 E-mail: tfb22@163.com

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助(CAFYBB2017SZ002)

Project supported: The Fundamental Research Funds for Central Public-interest Scientific Institution(CAFYBB2017SZ002)

中国是全世界竹林资源最丰富的国家,也是世界上竹笋产量最大的国家之一^[1]。在亚洲地区,毛竹(*Phyllostachys heterocycla* cv. *Pubescens*)是竹类植物中用途最为广泛的品种,毛竹竹笋也是一种重要可食林产品,富含多种营养物质,如膳食纤维、多糖、蛋白质、氨基酸、维生素和微量元素等^[2]。随着人们对竹笋产品需求的增加,竹笋生产方式由传统的粗放经营模式向集约经营模式转变,生产过程中增加了施肥、施药、覆盖等措施,导致土壤中重金属等污染物不断积累^[3]。竹笋主要用于鲜食、笋干加工或制盐渍笋,生产基地土壤环境及可食部分中重金属的积累将直接影响其产品质量与食用人群的健康风险^[4]。

目标危害系数(Target Hazard Quotient, THQ)是美国环保局(USEPA)建立的一种健康风险评估方法,该方法通过比较人体摄入量与参考剂量(Reference dose, RfDo)的比值来判断风险程度,在评价多种污染物对人体危害时采用危害指数(Hazard Index, HI)^[5-6]。潜在生态危害指数法常用于评估农田土壤污染程度^[7-9],其最大的特点是根据污染物毒性响应系数评估土壤潜在生态危害。

目前,竹笋食用安全研究主要集中在竹笋产地环境质量安全评价^[10]以及竹笋中有害污染物残留评价^[11-12]。朱美英等^[13]、李超英等^[14]调查发现,江西省和浙江省的蔬菜基地、水稻田等土壤中Cu、Zn污染情况比较严重,但是有关竹笋产地潜在生态危害以及食用健康风险评估却鲜有报道。本文测定了浙江省和江西省8个竹笋生产基地的土壤及竹笋中5种重金属(Pb、Cr、Cd、As、Cu)含量,并进行了生产基地潜在生态风险及竹笋可食部分重金属健康风险评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究样品来源于浙江省及江西省4个县区的8个竹笋生产基地,根据各竹笋产区大小及出笋情况,选择笋头刚露出土面的竹笋,同一采样点采集土壤样品,土壤采样深度为0~15 cm。每1~3 hm²设置一个采样单元,每个基地随机选取3个采样单元,并且每个采样单元内随机选取7~10个采样点采集多个样品组成1个混合样,8个竹笋生产基地共24个样品。采样基地与采样点分布见图1。

1.2 样品处理与分析

剥去笋壳取可食部分,磨碎后冷冻备用。将竹笋样品采用微波消解法消解,准确称取1 g,加入5 mL

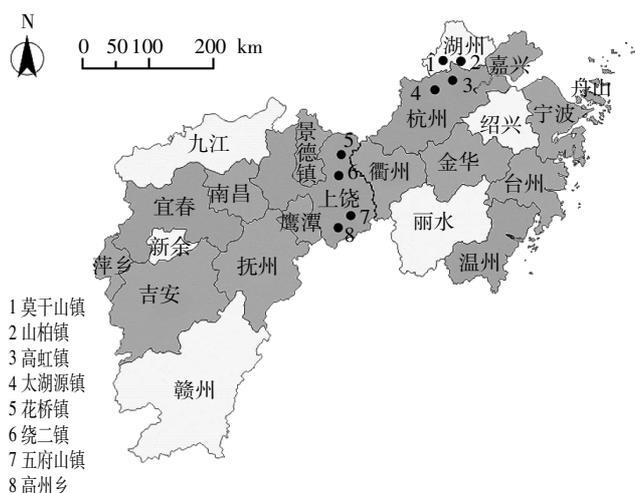


图1 采样基地与采样点分布

Figure 1 The distribution map of sampling sites

HNO₃, 150 °C预消解20 min,冷却后加入2 mL H₂O₂,密封后放入微波消解仪,消解程序设定为:5 min升温至130 °C,保持5 min;5 min升温至180 °C,保持30 min。然后取出微波消解罐赶酸、定容至25 mL,每个样品平行测定2次。竹笋样品消解液采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定。

土壤风干后,用多点取样法取出部分土样,玛瑙研钵研磨,过100目尼龙筛。土壤中Pb、Cr、Cd、Cu采用HNO₃-HClO₄-HF湿法消解,石墨炉原子吸收法测定;土壤中As采用1:1王水消解,原子荧光光谱法测定。每个样品平行测定2次。

1.3 评价方法

1.3.1 土壤单项污染指数法

单项污染指数计算公式:

$$P_i = \frac{C_i}{C_n}$$

式中: P_i 为单项污染指数; C_i 为实测浓度; C_n 为《食用林产品产地环境通用要求》(LY/T 1678—2014)标准中各重金属限值。

当 $P_i < 1$ 时,表示未污染; $P_i \geq 1$ 时,表示污染, P_i 越大污染越严重。

1.3.2 潜在生态危害指数法

1980年,瑞典化学家Håkanson^[15]提出了潜在生态危害指数法,确定了7种重金属的毒性响应系数 T_i 。徐争启等^[16]在此基础上又增加了5种重金属的毒性响应系数,通过计算毒性相应系数 T_i 与重金属单项污染指数 P_i 的乘积来评价污染程度。重金属单项

潜在生态危害系数(E_i)以及综合潜在生态危害指数(Risk Index, RI)计算公式:

$$E_i = T_i \times P_i$$

$$RI = \sum E_i$$

Pb、Cr、Cd、As、Cu的毒性响应系数 T_i 分别为5、2、30、10、5。根据文献[15, 17], E_i 值分级标准的第一级(轻微生态风险)上限值由单项污染指数($P_i=1$)与本研究的污染物中最大毒性响应系数($T_i=30$)相乘而得到,其他风险级别的上限值分别为上一级分级值的2倍;根据文献[17],采用Håkanson第一级上限值(150)除以8种污染物的毒性响应系数总值(133),得到单位毒性响应系数的分级值(1.13),乘以本研究5种重金属的毒性响应系数总值(52),并取十位的整数得到本研究的第一级分级界限值(58.6≈60)。重金属潜在生态危害指数分级标准见表1。

表1 重金属潜在生态危害指数分级标准

Table 1 Standards for the grading potential ecological risk index of heavy metals

潜在生态危害系数 E_i	潜在生态危害指数 RI	潜在生态危害程度
<30	<60	轻微生态风险
30~60	60~120	中等生态风险
60~120	120~240	强烈生态风险
120~240	240~480	很强生态风险
>240	>480	极强生态风险

1.3.3 人群健康风险评价

重金属在人体中代谢很慢,随着年龄的增加重金属可能会在人体某些器官不断积累,对人体造成慢性伤害。另外,食物中的重金属等污染物对儿童的伤害可能更严重^[18]。对于致癌效应,考虑人群的终生暴露危害,一般根据儿童期和成人期的暴露来评估污染物的终生致癌风险;对于非致癌效应,儿童体重较轻,暴露量较高,一般根据儿童期暴露来评估污染物非致癌风险。本研究评价居民通过食用竹笋这一途径摄入重金属的健康风险主要以USEPA提出的人体暴露健康风险评价模型为基本框架,针对中国人群体质对其部分参数进行修正后应用,并对成人与儿童可能产生的危害分别进行计算评估。计算公式如下:

$$THQ_{成人} = \frac{\left(\frac{ED_a \times FIR_a}{BW_a} + \frac{ED_c \times FIR_c}{BW_c} \right) EF \times C_f}{RfDo \times AT_{ca}}$$

$$THQ_{儿童} = \frac{EF \times ED_c \times FIR_c \times C_f}{RfDo \times DW_c \times AT_{nc}}$$

式中: EF 为人群暴露频率,350 d·a⁻¹; ED 为暴露持续时间,成人 ED_a 取24 a,儿童 ED_c 取6 a; FIR 为蔬菜日摄入量,成人 FIR_a 为255 g·d⁻¹^[19],儿童 FIR_c 为163 g·d⁻¹^[20]; C_f 为重金属含量,mg·kg⁻¹; $RfDo$ 为参考暴露剂量,Pb、Cr、Cd、As、Cu的参考暴露剂量分别为3.6、1500、1、0.3、40 μg·kg⁻¹·d⁻¹^[21]; BW 为人体平均体重,成人 BW_a 为56.8 kg,儿童 BW_c 为15.9 kg; AT_{nc} 为非致癌效应平均时间,2190 d; AT_{ca} 为致癌效应平均时间,26 280 d。

EF 、 ED 、 BW 、 AT 的取值参考《污染场地风险评估技术导则》(HJ-25.3—2014)。

实际生活中,食品中往往存在多种毒性污染物,污染物之间产生协同或拮抗作用使其毒性风险可能叠加或减弱^[22-23]。因此,评价多种重金属复合污染导致的人体潜在健康危害应该引起重视,在评价多种有害物质对人体危害时采用危害指数 HI ,其计算公式如下:

$$HI = \sum THQ$$

当 HI 大于1时表示该食品存在潜在健康风险,重金属 HI 数值越大表示竹笋食用潜在风险越大。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属污染状况

竹笋产地集中在我国南方大部分地区,本研究中土壤pH呈酸性,范围为4.23~5.43,差异不显著($P < 0.05$)。因此,以《食用林产品产地环境通用要求》(LY/T 1678—2014)中pH小于6.5的土壤质量标准为限量值,对土壤中5种重金属含量及单项污染指数进行分析。土壤中重金属含量见表2,单项污染指数见图2。

由表2可知,浙江、江西8个竹笋生产基地土壤中Pb、Cr、Cd、As、Cu平均含量分别为35.5、47.5、0.22、8.5、25.5 mg·kg⁻¹。江西省花桥镇竹笋基地土壤中Pb、Cd含量分别为54.2、0.58 mg·kg⁻¹,绕二镇Cd含量为0.31 mg·kg⁻¹,均超出限量值标准,其他地区土壤质量状况良好。浙江省莫干山、上柏、高虹和太湖源镇4个竹笋生产基地土壤中Pb和Cd平均含量均高于浙江省土壤背景值,江西省花桥镇竹笋生产基地土壤中Pb和Cd与绕二镇、五府山镇、高州乡竹笋生产基地土壤中Cd平均含量均高于江西省土壤背景值,说明近年来竹笋生产基地土壤受到Pb和Cd污染,导致土壤中该重金属含量升高。

由图2可知,浙江省莫干山、上柏、高虹、太湖源

表2 土壤中重金属含量($n=3$)
Table 2 The content of heavy metals in soil of the research area($n=3$)

样品来源	土壤重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
	Pb	Cr	Cd	As	Cu	pH
莫干山镇	27.7±0.9b	64.9±2.9b	0.10±0.01d	10.4±1.9ab	17.3±0.4b	4.7±0.5a
上柏镇	32.3±5.6b	23.8±2.8d	0.15±0.01d	4.8±0.01e	16.7±0.2b	4.7±0.3a
高虹镇	30.5±4.0b	52.6±3.8bc	0.12±0.01d	8.5±0.5cd	14.6±0.2b	4.9±0.3a
太湖源镇	31.2±1.8b	46.9±4.2c	0.15±0.02d	10.6±0.4a	24.3±2.2b	4.9±0.2a
花桥镇	54.2±9.8a*	78.2±3.6a	0.58±0.06a*	9.1±0.4bc	24.8±2.5b	5.2±0.2a
绕二镇	46.0±8.3a	29.2±9.2d	0.31±0.06b*	7.3±0.9d	44.6±16.5a	5.1±0.1a
五府山镇	28.5±0.8b	30.5±2.5d	0.13±0.01d	5.7±0.2e	18.4±1.5b	5.1±0.3a
高州乡	34.0±0.7b	53.9±15.8bc	0.25±0.02c	11.2±0.6a	43.5±7.2a	5.0±0.2a
平均值	35.5	47.5	0.22	8.5	25.5	5.0
参考值 ^[10]	15.2~75.3	18.0~57.0	0.06~1.03	3.1~14.7	10.3~73.5	4.2~5.0
背景值 1 ^[24]	23.7±6.8	52.9±43.1	0.07±0.06	9.2±7.9	17.6±12.9	—
背景值 2 ^[24]	32.3±14.3	45.9±24.7	0.11±0.14	14.9±13.2	20.3±10.3	—
限量值	50	120	0.3	40	50	—

注:结果以平均值±标准差表示,结果 ≥ 1 时保留1位小数,结果 < 1 时保留2位有效数字;*表示该测定结果超出LY/T 1678—2014限量值;表中同一列数据标注不同字母表示该元素含量在不同地区之间存在显著性差异($P < 0.05$);背景值1为浙江省土壤背景值,背景值2为江西省土壤背景值。

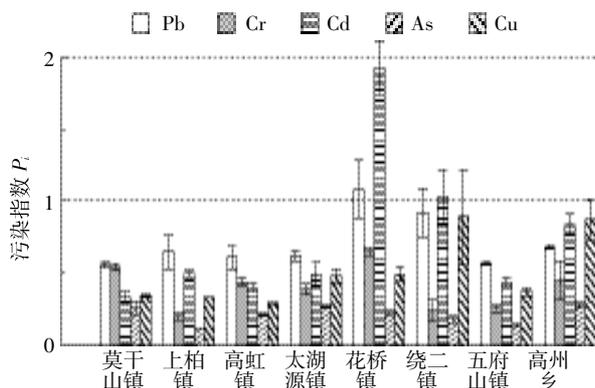


图2 土壤中重金属单项污染指数

Figure 2 The individual pollution index of heavy metal in soil

镇以及江西省五府山镇、高州乡等6个竹笋基地土壤中5种重金属污染指数均小于1;江西省绕二镇和高州乡竹笋基地土壤中Cu含量虽然未超标,但已接近限量值,花桥镇竹笋基地土壤中Pb和Cd以及绕二镇竹笋基地土壤中Cd污染指数均超过1,尤其是花桥镇竹笋基地土壤中Cd污染指数接近2,说明江西省花桥镇竹笋基地土壤质量安全存在隐患,这也可能是该地区众多矿山开发造成的土壤污染^[25]。总体来看,土壤中Cu、Cr和As污染指数均小于1,Pb和Cd受污染程度较高。

2.2 土壤重金属潜在生态危害指数

土壤中重金属单项污染指数评价方法能够较好地反映研究地区土壤污染程度,而潜在生态危害指数

法更侧重于以不同重金属毒性响应系数为依据评价土壤潜在生态危害^[16]。由图3可以看出,重金属Cd单项潜在生态危害系数(E_i)普遍高于其他重金属,江西省花桥镇、绕二镇Cd单项潜在生态危害系数(E_i)处于中等潜在生态危害程度,Pb、Cr、As和Cu单项潜在生态危害系数较低,均处于轻微生态危害程度,5种重金属单项潜在生态危害系数大小顺序为Cd>Pb>Cu>As>Cr。花桥镇Cd单项潜在生态危害系数值达到58,处于中等潜在生态危害程度,说明该地区Cd污染需引起重视。

从综合潜在生态危害指数来看,8个竹笋生产基地综合潜在生态危害指数由大到小依次为花桥镇>绕二镇>高州乡>太湖源镇>上柏镇>五府山镇>高虹镇>莫干山镇。由图2可知,花桥镇、绕二镇竹笋生产基地土壤中重金属Pb、Cd单项污染指数超标,但综合潜在生态危害指数表明,7个竹笋生产基地仍处于轻微生态风险,仅花桥镇基地处于中等生态危害程度,主要致险因子为Cd污染。虽然花桥镇Pb单项污染指数也出现超标,但在综合潜在生态危害指数中贡献率较低。

2.3 竹笋中重金属含量

各基地竹笋中重金属含量结果见表3。竹笋中重金属Pb、Cr、Cd、As和Cu含量范围分别为6.0~39.7、9.0~105.4、0.70~19.9、1.4~4.6、322.0~1648.9 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量大小顺序为Cu>Cr>Pb>Cd>As。其中Pb、Cr、Cd和

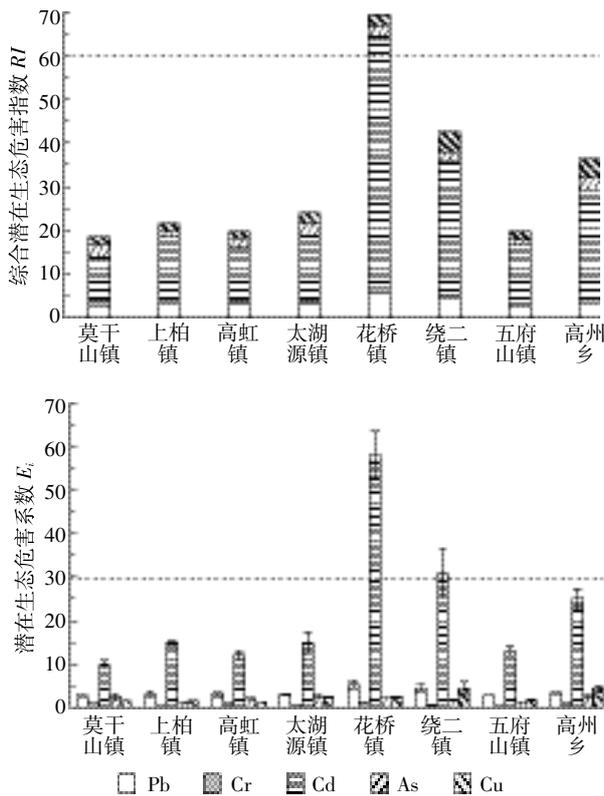


图3 土壤重金属潜在生态危害系数 E_i 与潜在生态危害指数 RI
Figure 3 The potential ecological risk (E_i and RI) of heavy metals in soil

As 均未超出森林食品质量安全通则(LY/T 1777—2008)和食品安全国家标准食品中污染物限量(GB 2762—2012)中的限值(该标准未规定 Cu 的限量值),可知

各基地竹笋质量状况良好。Cu、Cr 是人体所需的微量元素,同时也是有毒金属元素^[23],由于缺少竹笋中 Cu 元素限量标准,难以判断竹笋中 Cu 含量是否对人体产生不利影响。相比已有竹笋中重金属含量报道(表 3),本研究中竹笋重金属含量略低,可能与研究区域土壤质量有关。

2.4 竹笋对重金属富集系数

农产品对重金属的累积与土壤中该元素含量有一定的关系^[27]。由表 4 可知,竹笋中 As、Cu 和 Cd 与土壤中该元素含量显著相关($P<0.01$),而竹笋中 Pb 和 Cr 与土壤中该元素含量相关性不显著。植物对重金属的累积能力以富集系数来表示(植物中某元素含量/该元素在土壤中含量),富集系数越大,富集能力越强。由表 5 可知,竹笋可食部分对重金属富集能力由大到小为 $Cu>Cd>Cr>Pb>As$, 其中 Cu 的富集系数最大,其次为 Cd,平均富集系数分别为 3.3×10^{-2} 和 2.1×10^{-2} 。黄昀等^[27]研究结果显示,柑橘果肉中 Cd 富集系数为 4.7×10^{-3} , 莴笋中 Cd 富集系数为 1.1×10^{-1} , 辣椒中 Cd 富集系数为 5.1×10^{-2} , 甘蓝中 Cd 富集系数为 1.8×10^{-2} ,与竹笋相比,不同蔬菜对 Cd 富集系数由大到小为莴笋>辣椒>竹笋>甘蓝>柑橘果肉。图 2 及图 3 结果表明,基地土壤中主要致险因子为 Cd 污染,但竹笋中重金属 Cd 含量远低于 LY/T 1777—2008 的限值,说明竹笋对 Cd 累积能力较低。

2.5 竹笋中重金属人群健康风险评价

虽然此次研究结果显示竹笋中重金属含量均在

表 3 竹笋中重金属含量($n=3$)

Table 3 The content of heavy metals in bamboo shoots of the research area($n=3$)

样品来源	竹笋重金属含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
	Pb	Cr	Cd	As	Cu
莫干山镇	30.4±6.9d	90.9±12.9a	2.1±0.7cd	3.5±0.7ab	604.3±24.1ef
上柏镇	26.8±4.3ab	26.5±2.2b	0.75±0.05d	2.2±0.3bc	701.8±39.2de
高虹镇	15.6±3.5bc	29.8±10.8b	1.8±0.4cd	3.4±1.3ab	343.1±21.6f
太湖源镇	7.9±1.8c	26.2±4.3b	2.6±0.9cd	3.8±1.2a	508.9±97.2ef
花桥镇	25.8±5.2ab	14.0±2.6b	14.0±5.2a	3.2±0.8ab	885.6±120.8cd
绕二镇	21.9±14.2ab	12.1±2.6b	5.3±1.4bc	2.2±0.5bc	1 276.3±371.0a
五府山镇	9.4±1.0c	20.7±11.2b	4.4±0.2bcd	1.5±0.1c	974.9±104.0bc
高州乡	30.8±8.1a	19.7±14.8b	8.2±3.7b	3.4±0.8ab	1 166.1±28.3ab
平均值	21.1	30.0	4.9	2.9	807.6
参考文献[12,26]	64.6	15.8	10.3	12.6	—
限量值	100	500	50	50	—

注:结果以平均值±标准差表示,结果 ≥ 1 时保留 1 位小数,结果 < 1 时保留 2 位有效数字;表中同一列数据标注不同字母表示该元素含量在不同地区之间存在显著性差异($P<0.05$);参考值为已发表文献竹笋中重金属含量范围;Pb、Cd 和 As 限量值参考森林食品质量安全通则(LY/T 1777—2008),Cr 限量值参考食品安全国家标准食品中污染物限量(GB 2762—2012)。

表4 竹笋与土壤中重金属相关性

Table 4 Correlation of heavy metals between bamboo shoots and soil

相关性		竹笋				
		As	Cu	Pb	Cr	Cd
土壤	As	0.67**	-0.14	0.088	0.31	0.19
	Cu	0.032	0.81**	0.35	-0.37	0.39
	Pb	-0.13	0.35	0.12	-0.44*	0.58**
	Cr	0.54**	-0.20	0.26	0.27	0.58**
	Cd	-0.013	0.38	0.20	-0.45*	0.84**

注:**在 $P<0.01$ 水平上显著相关;*在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

表5 竹笋中重金属富集系数

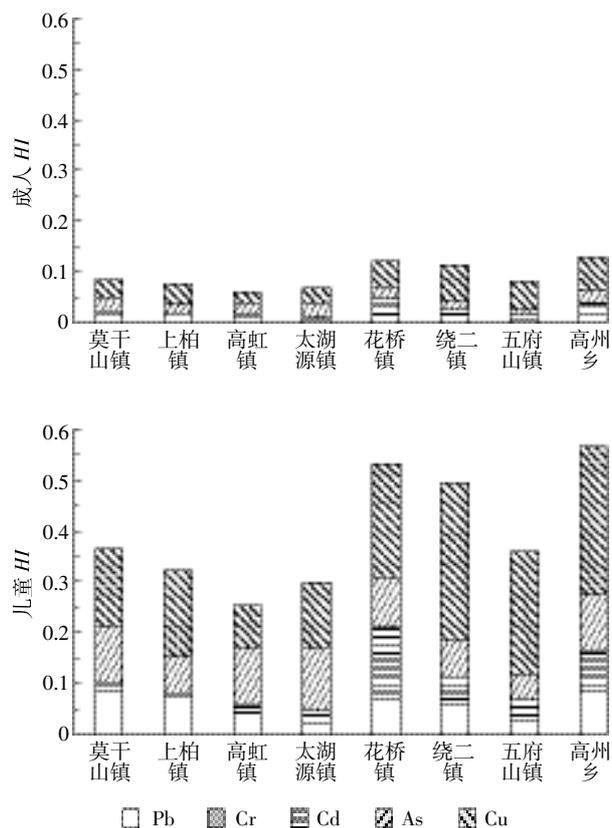
Table 5 Bioconcentration factor of heavy metals in bamboo shoots

重金属	平均值	最大值	最小值
Pb	6.1×10^{-4}	1.1×10^{-3}	2.5×10^{-4}
Cr	6.6×10^{-4}	1.4×10^{-3}	1.8×10^{-4}
Cd	2.1×10^{-2}	3.3×10^{-2}	5.0×10^{-3}
As	3.4×10^{-4}	4.6×10^{-4}	2.6×10^{-4}
Cu	3.3×10^{-2}	5.3×10^{-2}	2.1×10^{-2}

LY/T 1777—2008 与 GB 2762—2012 限量范围内,但重金属在人体中代谢缓慢,可能会在人体中不断积累从而对人体产生长期的慢性损伤。因此,应综合考虑食用竹笋中重金属含量、人群暴露频率、暴露持续时间、食品日摄入量、参考暴露剂量和致癌与非致癌效应平均时间等参数,进行目标风险系数(THQ)及人体健康危害指数(HI)评价,评价结果见表6及图4。

目标风险系数 THQ 结果显示,各基地竹笋中重金属含量对人体健康风险较低,5种重金属 THQ 值均小于1。通过竹笋摄入重金属对成人和儿童造成的健康风险顺序均为 $Cu>As>Pb>Cd>Cr$ 。虽然我国食品

安全国家标准已废除 Cu 的限量标准,但研究结果显示 Cu 对人体的健康风险最高,绕二镇 Cu 的 THQ 最高达到0.31。此外,通过对比食用竹笋对成人和儿童造成的目标风险系数发现,重金属对儿童造成的健康风险明显高于成人。从多种重金属人体健康危害指数结果来看,不同竹笋生产基地5种重金属目标风险系数累加后的人体健康危害指数存在差异,各竹笋产区

图4 竹笋中多种重金属健康危害指数 HI Figure 4 The heavy metals in bamboo shoots hazard index (HI) through consumption of bamboo shoots表6 竹笋中重金属目标风险系数 THQ Table 6 The target hazards quotients (THQ) of heavy metals in bamboo shoots

样品来源	Pb		Cr		Cd		As		Cu	
	成人	儿童								
莫干山镇	1.9×10^{-2}	8.3×10^{-2}	1.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}	4.7×10^{-3}	2.0×10^{-2}	2.6×10^{-2}	1.1×10^{-1}	3.4×10^{-2}	1.5×10^{-1}
上柏镇	1.7×10^{-2}	7.3×10^{-2}	4.0×10^{-5}	1.7×10^{-4}	1.7×10^{-3}	7.4×10^{-3}	1.7×10^{-2}	7.2×10^{-2}	4.0×10^{-2}	1.7×10^{-1}
高虹镇	1.0×10^{-2}	4.3×10^{-2}	4.5×10^{-5}	2.0×10^{-4}	4.0×10^{-3}	1.7×10^{-2}	2.6×10^{-2}	1.1×10^{-1}	1.9×10^{-2}	8.4×10^{-2}
太湖源镇	5.0×10^{-3}	2.2×10^{-2}	3.9×10^{-5}	1.7×10^{-4}	6.0×10^{-3}	2.6×10^{-2}	2.9×10^{-2}	1.2×10^{-1}	2.9×10^{-2}	1.3×10^{-1}
花桥镇	1.6×10^{-2}	7.0×10^{-2}	2.1×10^{-5}	9.2×10^{-5}	3.2×10^{-2}	1.4×10^{-1}	2.4×10^{-2}	1.0×10^{-1}	5.0×10^{-2}	2.2×10^{-1}
绕二镇	1.4×10^{-2}	6.0×10^{-2}	1.8×10^{-5}	7.9×10^{-5}	1.2×10^{-2}	5.3×10^{-2}	1.6×10^{-2}	7.1×10^{-2}	7.2×10^{-2}	3.1×10^{-1}
五府山镇	5.9×10^{-3}	2.6×10^{-2}	3.1×10^{-5}	1.4×10^{-4}	1.0×10^{-2}	4.3×10^{-2}	1.1×10^{-2}	4.9×10^{-2}	5.5×10^{-2}	2.4×10^{-1}
高州乡	1.9×10^{-2}	8.4×10^{-2}	3.0×10^{-5}	1.3×10^{-4}	1.9×10^{-2}	8.1×10^{-2}	2.5×10^{-2}	1.1×10^{-1}	6.6×10^{-2}	2.9×10^{-1}
平均值	1.3×10^{-2}	5.8×10^{-2}	4.5×10^{-5}	2.0×10^{-4}	1.1×10^{-2}	4.8×10^{-2}	2.2×10^{-2}	9.5×10^{-2}	4.6×10^{-2}	2.0×10^{-1}

对成人 HI 为 0.059~0.13, 对儿童 HI 为 0.25~0.57, 高州乡 HI 最高, 但均未超过 1。吴倩^[28]对食用竹笋的摄入量进行调查发现, 不同地区人群竹笋的摄入量差异较大, 鲜竹笋每日摄入量范围 0.07~757.58 g。当高州乡地区儿童每日摄入竹笋超过 288.4 g 时, 摄入 Cu、As、Pb、Cd 和 Cr 的 HI 值将大于 1, 可能对儿童引起健康风险; 当儿童每日摄入竹笋超过 525.8 g 时, 摄入 Cu 的 THQ 值将大于 1, 可能对儿童引起急性毒性。虽然单一食品中重金属健康风险较低, 但多种食物的摄入可能会导致人体积累的多种重金属 HI 值超过 1, 从而引起潜在的人体健康风险。

3 结论

(1) 研究区竹笋生产基地土壤质量总体状况良好, 但基地土壤中 Pb、Cd 和 Cu 含量略高于浙江省与江西省土壤背景值。江西省花桥镇、绕二镇基地土壤中 Pb 和 Cd 含量超出 LY/T 1678—2014 限量值。研究区竹笋生产基地土壤中 Cd 单项潜在生态危害系数最高, 但生产基地综合潜在生态危害程度较低, 仅江西省花桥镇基地处于中等生态危害程度。

(2) 虽然江西省花桥镇、绕二镇竹笋生产基地土壤中 Pb、Cd 含量超标, 但竹笋可食部分对重金属积累较少, 竹笋中重金属 Pb、Cr、Cd、As 和 Cu 含量均未超出 LY/T 1777—2008 限量值。通过竹笋摄入 Pb、Cr、Cd、As 和 Cu 等 5 种重金属健康危害指数 HI 均低于 USEPA 推荐的最大可接受水平 1.0, 不会对暴露人群健康造成危害。

参考文献:

- [1] 江泽慧, 费本华, 范少辉. 积极发展竹产业 大力推进生态文明建设[J]. 国家林业局管理干部学院学报, 2014, 13(2): 12-16.
JIANG Ze-hui, FEI Ben-hua, FAN Shao-hui. Actively develop bamboo industry and vigorously promote the ecological civilization construction[J]. *State Academy of Forestry Administration Journal*, 2014, 13(2): 12-16.
- [2] 周文伟, 何奇江, 叶春球, 等. 不同季节毛竹笋营养成分比较分析[J]. 浙江林业科技, 2013, 33(4): 64-67.
ZHOU Wen-wei, HE Qi-jiang, YE Chun-qiu, et al. Comparative analysis of nutrients in bamboo shoot at different seasons[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2013, 33(4): 64-67.
- [3] 姜培坤, 叶正钱, 徐秋芳. 高效栽培雷竹林土壤重金属含量的分析研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 61-63.
JIANG Pei-kun, YE Zheng-qian, XU Qiu-fang. Changes in heavy metal elements of soil in ecosystem of *Phyllostachys praecox* under intensive management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 61-63.
- [4] Nabulo G, Black C R, Craigon J, et al. Does consumption of leafy vegetables grown in peri-urban agriculture pose a risk to human health?[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 389-398.
- [5] 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 Na, WANG Qi-chao, ZHENG Dong-mei. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ[J]. *Acta Scientiae Circumstantial*, 2007, 27(4): 672-678.
- [6] Zheng N, Wang Q, Zheng D. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 383(1/2/3): 81-89.
- [7] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37-44.
AN Qian, GONG Xiao-shuang, CHEN Hong-wei, et al. Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 37-44.
- [8] 韦绪好, 孙庆业, 程建华, 等. 焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2304-2311.
WEI Xu-hao, SUN Qing-ye, CHENG Jian-hua, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils in Jiaogang Lake basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2304-2311.
- [9] 丰楠, 刘佳娇. 哈尔滨菜地土壤重金属潜在生态危害研究[J]. 环境科学与管理, 2015(10): 143-145.
FENG Nan, LIU Jia-jiao. Research on ecology hazard of soils heavy metal pollution[J]. *Environmental Science and Management*, 2015(10): 143-145.
- [10] 丁明, 倪张林, 莫润宏, 等. 浙西南竹笋主产区土壤重金属环境质量分析与评价[J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 236-242.
DING Ming, NI Zhang-lin, MO Run-hong, et al. Analysis and evaluation of heavy metal environmental quality in bamboo shoot producing areas in South-West Zhejiang Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(33): 236-242.
- [11] 华祯惠, 毛仙琴, 许梅. 毛竹林土壤及竹笋重金属含量分析[J]. 世界竹藤通讯, 2014, 12(3): 26-28.
HUA Zhen-hui, MAO Xian-qin, XU Mei. Analysis of heavy metal contents in moso bamboo forest soil and bamboo shoots[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2014, 12(3): 26-28.
- [12] 冯肖军. 绍兴市春笋重金属含量及其质量安全评价[J]. 浙江林业科技, 2015, 35(5): 60-64.
FENG Xiao-jun. Heavy metal content in bamboo shoot from Shaoxing and quality safety evaluation[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2015, 35(5): 60-64.
- [13] 朱美英, 罗运阔, 卢志红, 等. 南昌市郊蔬菜基地土壤重金属含量及评价[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(18): 5500-5501.
ZHU Mei-ying, LUO Yun-kuo, LU Zhi-hong, et al. Content and evaluation of heavy metal in soil of vegetable growth base in Nanchang Suburb[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(18): 5500-

- 5501.
- [14] 李超英, 计小江, 毛红瑞, 等. 浙江省义乌市蔬菜基地土壤重金属元素的污染评价[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(3):561-566.
LI Chao-ying, JI Xiao-jiang, MAO Hong-rui, et al. Assessment of soil heavy metal contamination in vegetable bases of Yiwu City[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2013, 25(3):561-566.
- [15] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [16] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [17] 马建华, 王晓云, 侯千, 等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 2011, 30(3):486-495.
MA Jian-hua, WANG Xiao-yun, HOU Qian, et al. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in surface dust on urban kindergartens[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(3):486-495.
- [18] 兰砥中, 雷鸣, 周爽, 等. 体外模拟实验法评价湘南某矿区大米中重金属的人体健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1897-1903.
LAN Di-zhong, LEI Ming, ZHOU Shuang, et al. Health risk assessment of heavy metals in rice grains from a mining-impacted area in South Hunan by in vitro simulation method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1897-1903.
- [19] 何宇纳, 赵丽云, 于冬梅, 等. 2010—2012年中国成年居民蔬菜和水果摄入状况[J]. 中华预防医学杂志, 2016, 50(3):221-224.
HE Yu-na, ZHAO Li-yun, YU Dong-mei, et al. Consumption of fruits and vegetables in Chinese adults from 2010 to 2012[J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2016, 50(3):221-224.
- [20] 李子一, 张雅蓉, 王金子, 等. 中国3~12岁儿童膳食种类及摄入量调查[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(9):78-82.
LI Zi-yi, ZHANG Ya-rong, WANG Jin-zi, et al. Investigation on dietary consumption of different categories of food among 3~12 year old children in China[J]. *Food and Nutrition in China*, 2014, 20(9):78-82.
- [21] USEPA. Regional removal management level(RML) summary table[R]. Philadelphia (PA): United States Environmental Protection Agency, 2015.
- [22] Muthusamy S, Peng C, Ng J C. The binary, ternary and quaternary mixture toxicity of benzo(a)pyrene, arsenic, cadmium and lead in HepG2 cells[J]. *Toxicology Research*, 2016, 5(2):703-713.
- [23] Zeng Y L, Wang L, Jiang L, et al. Joint toxicity of lead, chromium, cobalt and nickel to *Photobacterium phosphoreum* at No observed effect concentration[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 95(2):260-264.
- [24] 滕葳, 柳琪, 李倩, 等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:261-263.
TENG Wei, LIU Qi, LI Qian, et al. Hazard and risk assessment of heavy metal pollution on agricultural products[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:261-263.
- [25] 陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 等. 江西德兴矿区土壤重金属污染的富集因子分析[J]. 金属矿山, 2005(12):57-60.
CHEN Cui-hua, NI Shi-jun, HE Bin-bin, et al. Enrichment factor analysis of soil pollution by heavy metals in dexing mining area, Jiangxi Province[J]. *Metal Mine*, 2005(12):57-60.
- [25] 龚梦丹, 顾燕青, 王小雨, 等. 杭州市菜地蔬菜重金属污染评价及其健康风险分析[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(6):1024-1031.
GONG Meng-dan, GU Yan-qing, WANG Xiao-yu, et al. Evaluation on heavy metal pollution and its health risk of vegetables in Hangzhou[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(6):1024-1031.
- [26] 吕爱华, 尚素微, 张宏亮, 等. 浙江省毛竹鞭笋重金属含量及其安全质量评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(8):147-150.
LÜ Ai-hua, SHANG Su-wei, ZHANG Hong-liang, et al. Contents and quality safety assessment of heavy metals in rhizome shoots of *Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie in Zhejiang Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(8):147-150.
- [27] 黄昀, 刘光德, 李其林, 等. 农产品对土壤中重金属的富集能力研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(6):285-289.
HUANG Yun, LIU Guang-de, LI Qi-lin, et al. Investigation on accumulating ability of agricultural products to soil heavy metal[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(6):285-289.
- [28] 吴倩. 浙江省竹笋加工产品中部分有害物质风险评估[D]. 浙江农林大学, 2014.
WU Qian. Hazard evaluation on some harmful substances of bamboo shoot products at Zhejiang Province[D]. Zhejiang A&F University, 2014.