

## 浙、川、湘毛竹主产区冬笋重金属质量分数及健康风险评估

张延平, 陈振超, 汤富彬, 任传义, 倪张林, 屈明华

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

**摘要:** 测定了浙江省、四川省和湖南省毛竹 *Phyllostachys edulis* 冬笋中砷、铅、镉和铬等元素的质量分数, 并统计超标情况; 采用单因子污染指数、综合因子污染指数法和目标风险系数法对毛竹冬笋中各重金属健康风险系数的比重和食用安全性进行评价。结果表明: 各地冬笋中4种重金属均存在超标现象; 浙江省冬笋砷、铅、镉和铬的超标率分别为0.6%, 2.3%, 1.1%和0.6%; 四川省冬笋铅和镉的超标率分别为46.0%和45.3%; 湖南省冬笋砷、铅和镉的超标率分别为2.5%, 9.3%和18.6%。综合因子污染指数大小顺序为四川省>湖南省>浙江省; 成人高危系数大小顺序为四川省>湖南省>浙江省, 儿童高危系数则为湖南省>四川省>浙江省, 即使按最大摄入量计算, 食用产自这3省的冬笋时, 这4种重金属也不会对成人造成健康风险; 但是当儿童摄入湖南冬笋超过134 g·d<sup>-1</sup>时, 可能存在重金属健康风险。图1表4参22

**关键词:** 森林生态学; 毛竹; 冬笋; 重金属; 质量分数分析; 风险评估

**中图分类号:** S644.2; TS201.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2018)04-0635-07

## Content and risk assessment of heavy metals in winter shoots of *Phyllostachys edulis* from Zhejiang, Sichuan, and Hunan Provinces

ZHANG Yanping, CHEN Zhenchao, TANG Fubin, REN Chuanyi, NI Zhanglin, QU Minghua

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** To investigate pollution levels and evaluate potential risks of arsenic (As), lead (Pb), cadmium (Cd), and chromium(Cr) in winter shoots of *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo), concentrations and excesses above the standard rate for heavy metals (As, Pb, Cd, and Cr) in winter shoots of Moso bamboo collected from Zhejiang, Sichuan, and Hunan were measured and summarized. A single factor pollution index, comprehensive pollution index, and target hazard quotient (THQ) were applied to assess pollution levels and food safety of heavy metals in winter bamboo shoots. Also, proportions of each heavy metal in THQ were analyzed. Results showed that the content of As, Pb, Cd, and Cr exceeded allowable limits. Percentages exceeding allowable limits with winter Moso bamboo shoots in Zhejiang were As (0.6%), Pb (2.3%), Cd (1.1%), and Cr (0.6%); in Sichuan were Pb (46.0%) and Cd (45.3%); and in Hunan were As (2.5%), Pb (9.3%), and Cd (18.6%). The order for the comprehensive pollution index values was Sichuan > Hunan > Zhejiang. The order of heavy metal Hazard Index values for adults was Sichuan > Hunan > Zhejiang and for children was Hunan > Sichuan > Zhejiang. This study indicated that heavy metals caused no harm to adults even with the maximum acceptable daily intake of winter Moso bamboo shoots, but when children had more than 134 g of Hunan winter Moso bamboo shoots per day, a health risk could appear. [Ch, 1 fig. 4 tab. 22 ref.]

**Key words:** forest ecology; *Phyllostachys edulis*; winter bamboo shoots; heavy metals; content analysis; risk assessment

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-08-03

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)

作者简介: 张延平, 从事经济林产品质量安全研究。E-mail: dqpgu@163.com。通信作者: 汤富彬, 研究员, 从事经济林质量安全及检测技术研究。E-mail: tfb22@163.com

中国是世界最大的竹主产区,可食竹种有200多种<sup>[1]</sup>,以长江以南地区为主要分布区。《本草纲目》中记载竹笋具有“利九窍、通血脉、化痰涎、消食胀”的药用功效<sup>[2]</sup>,竹笋富含纤维素、蛋白质、还原糖、氨基酸、矿质元素以及维生素、多酚、黄酮类等功能活性成分<sup>[3-5]</sup>。据统计全球食用笋消费量以每年15%的速度递增,且据相关专家预测,在未来很长的时间内,食用笋将成为国内外市场倍受欢迎的食品,具有巨大的市场潜力和广阔的开发前景<sup>[6]</sup>。随着竹笋规模化生产逐渐加大,肥料的使用量不断增加。研究表明,除土壤自身的成土母质及成土过程重金属自然堆积<sup>[8]</sup>,有机肥、化肥中含有的重金属元素,如砷、铅、镉和铬等,随施肥作业与肥料螯合,进一步增加了重金属在竹笋中的累积<sup>[7]</sup>。而所有重金属通过食物链富集,最终对人体造成健康威胁,对人类危害严重<sup>[9-10]</sup>。研究竹笋中重金属质量分数水平并进行食用健康风险评估,对保证竹笋产业健康、可持续发展及竹笋食用安全具有重要作用。本研究以浙江省、四川省和湖南省中国毛竹 *Phyllostachys edulis* 冬笋主产区为采样点,采集并测定冬笋样品中的砷、铅、镉和铬等元素的质量分数,采用单因子、综合因子污染评价法评价冬笋中重金属质量分数水平,并进行健康风险评估。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样地设置与样品采集

采样时间为2015年12月-2016年1月,采样地点为浙江省、四川省和湖南省3个省份的毛竹冬笋主产区,其中,浙江省9个城市(湖州市、杭州市、绍兴市、宁波市、衢州市、金华市、台州市、丽水市、温州市),四川省4个城市(泸州市、宜宾市、乐山市、成都市),湖南省2个城市(长沙市、益阳市)。采用随机采样的方法,共采集冬笋样品浙江省177份,四川省150份,湖南省118份。为减少采样地区间差异,提高风险评估的可比性,本研究采集的所有冬笋样品均为毛竹冬笋,且每个冬笋样品质量均不少于1 kg。

### 1.2 样品处理

采集到的冬笋样品用自封袋装好,带回实验室;剥去笋壳,用蒸馏水清洗掉笋上附着的泥土,将可食部分用食品粉碎机磨碎后装入塑料瓶中,冷冻保鲜待测。

### 1.3 样品重金属检测

冬笋样品中铅、镉、铬、砷和汞的测定分别参考国家标准GB 5009.12-2010《食品安全国家标准食品中铅的测定》,GB 5009.15-2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》,GB 5009.123-2014《食品中铬的测定》,GB 5009.11-2014《食品中总砷及无机砷的测定》和GB 5009.17-2014《食品中总汞及有机汞的测定》。由于汞元素质量分数全部低于检出限,所以后续的评价计算不涉及汞元素。

### 1.4 冬笋中重金属质量分数水平评价方法

1.4.1 重金属单因子污染评价 对冬笋中重金属进行单因子和综合因子污染水平评价可直观反映冬笋受重金属污染水平大小。采用单因子污染指数评价法分别对每种重金属单独进行污染评价,经统计得出冬笋受各重金属污染的程度,可实现对冬笋中每种重金属的污染评价。计算如式(1)所示:

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

式(1)中:  $P_i$  表示冬笋中重金属  $i$  的单因子污染指数,  $C_i$  为冬笋重金属  $i$  质量分数的仪器测定值,  $S_i$  为冬笋重金属  $i$  的限量标准。  $P_i \leq 1$  表明冬笋未明显受到重金属  $i$  的污染;  $P_i > 1$  说明冬笋已明显被重金属  $i$  所污染。  $P_i$  越大,则说明冬笋受这一重金属的污染程度越大。

1.4.2 重金属综合因子污染评价 综合因子污染评价可以全面、客观地反映冬笋中重金属的污染状况,重点突出高质量分数的重金属对冬笋品质的影响<sup>[11]</sup>。具体计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{max}}\right]^2 + \left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}\right]^2}{2}} \quad (2)$$

式(2)中:  $P_{\text{综}}$  表示样品冬笋中砷、铅、镉和铬的综合因子污染指数。分别将冬笋中单因子污染指数的最大值、平均值的平方代入求平均值并计算平方根。  $P_{\text{综}} \leq 1$  表示冬笋受所有重金属污染的程度较轻;  $P_{\text{综}} > 1$  表示冬笋受所有重金属污染的程度较重。  $P_{\text{综}}$  越大,表示冬笋受重金属污染的程度越重。

## 1.5 冬笋中重金属健康风险评估

人体通过膳食摄入的重金属代谢较慢，具有一定的累积效应，需要对冬笋中的重金属进行健康风险评估。目前健康风险评价常以美国环保署(USEPA)人体健康风险评价作为基础，同时根据中国居民现有的体质及日常膳食情况，对参数加以修正和调整应用。成人与儿童间的重金属风险暴露情况因体质量、冬笋日摄入量、暴露时间等不同，需分别评估，同时考虑终生暴露对成人造成的致癌风险以及短期暴露对儿童造成的非致癌风险。参照文献[12]，计算公式如下：

$$Q_a = \frac{\left( \frac{E_{Da} \times F_a}{W_a} + \frac{E_{Dc} \times F_c}{W_c} \right) E_f \times C_f}{R_f \times A_a}; \quad (3)$$

$$Q_c = \frac{E_f \times E_{Dc} \times F_c \times C_f}{R_f \times W_c \times A_c}; \quad (4)$$

$$I_H = \sum_{i=1}^n Q_{i0} \quad (5)$$

式(3)~(5)中： $Q$ 表示目标人群单一重金属的目标风险系数(下标  $a$  表示成人，下标  $c$  表示儿童)， $E_D$ 表示人体通过摄入冬笋引起的重金属持续暴露时间(本研究中成人  $E_{Da}$  取值 24 a，儿童  $E_{Dc}$  取值 6 a)<sup>[13]</sup>； $F$ 代表人均冬笋的日最大摄入量(这里取人均日摄入蔬菜的量，成人  $F_a=255 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ，儿童  $F_c=163 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[12]</sup>； $W$ 表示健康人群的平均体质量(本研究中成人  $W_a=63.45 \text{ kg}$ ，儿童  $W_c=25.6 \text{ kg}$ )<sup>[14]</sup>； $E_f$ 指年暴露频率(本研究中成人、儿童均取值  $330 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>； $C_f$ 指本研究的冬笋中重金属  $F$  的质量分数(单位为  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )， $R_f$ 指重金属日参考暴露剂量(总砷、铅、镉、三价铬参考暴露剂量依次为 0.3, 3.5, 1.0, 1 500.0  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[16-17]</sup>。需要指出的是：植物体中砷元素存在砷酸( $\text{As}^{5+}$ )，亚砷酸( $\text{As}^{3+}$ )，单甲基砷酸(MMA)，二甲基多砷酸(DMA)和砷糖(AsC)等多种形态，且有机砷的毒性远大于无机砷<sup>[18]</sup>。本实验测定的是冬笋样品中的总砷，故后续砷的质量分数评价及风险评估参考总砷暴露剂量。自然界中铬元素一般以三价铬( $\text{Cr}^{3+}$ )或者六价铬( $\text{Cr}^{6+}$ )存在，且 $\text{Cr}^{6+}$ 的毒性强于 $\text{Cr}^{3+}$ <sup>[19]</sup>，而在植物中几乎以 $\text{Cr}^{3+}$ 存在<sup>[20]</sup>，故后续健康风险评估以摄入 $\text{Cr}^{3+}$ 为准。 $A_a$ 为致癌效应平均暴露时间( $70 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}=25\ 550 \text{ d}$ )， $A_c$ 为非致癌效应平均时间( $6 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}=2\ 190 \text{ d}$ )<sup>[11,14]</sup>。 $I_H$ 代表多种重金属目标风险系数的加和，又称为高危系数， $I_H \leq 1$ 表明通过食用冬笋，重金属对人体无健康风险； $I_H > 1$ 则表明摄入冬笋重金属可能会对人体造成健康风险<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 毛竹冬笋中重金属质量分数分析

根据 GB 2762-2017《食品中污染物限量》和 LY/T 1777-2008《森林食品质量安全通则》可知，食用冬笋中重金属的限量值为砷 $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，铅 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，镉 $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，铬 $\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由表 1 可知：浙江省冬笋总体砷、铅、镉和铬质量分数均有超标，但超标率低，超标率分别是 0.6%，2.3%，1.1%和 0.6%。浙江丽水市冬笋铅、镉和铬超标，超标率分别为 8.0%，8.0%和 4.0%；浙江衢州市冬笋铅元素超标，超标率为 3.3%；浙江金华市冬笋砷元素超标，超标率为 16.7%；浙江台州市冬笋铅元素超标，超标率为 11.1%；浙江宁波市冬笋镉超标，超标率最大，为 70.0%；浙江温州市、绍兴市、杭州市和湖州市的冬笋样品均未检出重金属超标。四川省冬笋总体上砷、铬元素均未超标，但检出铅、镉超标，超标率分别达 46.0%和 45.3%，主要分布在宜宾市、泸州市，超标率分别为 65.0%和 75.0%。湖南省冬笋仅铬元素未超标，砷、铅和镉的超标率分别为 2.5%，9.3%和 18.6%；浏阳市的 4 种重金属均未超标，益阳市砷、铅和镉均超标，超标率分别为 14.2%，9.7%和 19.5%。

用变异系数衡量不同冬笋样本离散程度的指标，变异系数越大，则表明冬笋受人为活动的干扰越大或冬笋受重金属污染的程度越大。当变异系数小于 10%时为弱变异，在 10%~30%时为中等变异，变异系数大于 30%时为强变异<sup>[11]</sup>。湖南浏阳市冬笋砷、浙江宁波市冬笋铅、浙江金华市冬笋镉、浙江温州市冬笋铬、四川泸州市冬笋铬等为弱及中等变异，且重金属未超标，说明这些采样地区冬笋中重金属质量分数分布差异较小，来源受外界干扰小；而湖南益阳市冬笋镉为中等变异，超标率 19.5%，这可能与当地土壤的镉质量分数较高有关。除这 4 个地区的部分冬笋中重金属为中等或弱变异外，其余采样地区的冬笋重金属为强变异，表明冬笋中这 4 种重金属质量分数空间分布大，受外源干扰明显。

表1 各省冬笋中重金属质量分数

Table 1 Heavy metal contents in winter bamboo shoots from provinces of Sichuan, Hunan and Zhejiang

| 采样区域  | $\omega_{As} /(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 超标率/% | $\omega_{Pb} /(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 超标率/% | $\omega_{Cd} /(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 超标率/% | $\omega_{Cr} /(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 超标率/% |
|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
| 丽水市   | 0.002 9~0.011 0(46.5)                         | 0.0   | 0.000 7~0.190 0(46.5)                         | 8.0   | 0.000 8~0.071 0(89.1)                         | 8.0   | 0.063 0~0.560 0(48.4)                         | 4.0   |
| 温州市   | 0.003 7~0.011 0(43.9)                         | 0.0   | 0.027 0~0.056 0(30.6)                         | 0.0   | 0.002 0~0.036 0(74.2)                         | 0.0   | 0.310 0~0.500 0(17.0)                         | 0.0   |
| 衢州市   | 0.002 4~0.018 0(38.0)                         | 0.0   | 0.009 5~0.150 0(69.2)                         | 3.3   | 0.001 7~0.050 0(51.0)                         | 0.0   | 0.003 7~0.500 0(118.8)                        | 0.0   |
| 浙 金华市 | 0.009 2~0.088 0(131.6)                        | 16.7  | 0.035 0~0.100 0(44.8)                         | 0.0   | 0.034 0~0.043 0(9.2)                          | 0.0   | 0.050 0~0.360 0(77.8)                         | 0.0   |
| 江 台州市 | 0.005 0~0.026 0(59.8)                         | 0.0   | 0.021 0~0.110 0(63.8)                         | 11.1  | 0.011 0~0.031 0(38.8)                         | 0.0   | 0.010 0~0.160 0(73.5)                         | 0.0   |
| 省 绍兴市 | 0.003 9~0.046 0(75.1)                         | 0.0   | 0.018 0~0.099 0(55.6)                         | 0.0   | 0.007 9~0.048 0(39.7)                         | 0.0   | 0.012 0~0.420 0(74.8)                         | 0.0   |
| 宁波市   | 0.004 9~0.015 0(110.0)                        | 0.0   | 0.043 0~0.094 0(27.7)                         | 0.0   | 0.004 5~0.032 0(62.8)                         | 70.0  | 0.023 0~0.450 0(75.9)                         | 0.0   |
| 杭州市   | 0.004 3~0.037 0(81.5)                         | 0.0   | 0.008 6~0.100 0(54.5)                         | 0.0   | 0.000 8~0.039 0(88.2)                         | 0.0   | 0.007 0~0.460 0(100.3)                        | 0.0   |
| 湖州市   | 0.002 1~0.040 0(76.1)                         | 0.0   | 0.008 3~0.100 0(55.6)                         | 0.0   | 0.000 8~0.049 0(66.5)                         | 0.0   | 0.002 8~0.032 0(116.5)                        | 0.0   |
| 平均值   | 0.009 8(89.2)                                 | 0.6   | 0.052 0(58.4)                                 | 2.3   | 0.022 0(69.4)                                 | 1.1   | 0.170 0(98.9)                                 | 0.6   |
| 成都市   | 0.005 0~0.015 0(53.6)                         | 0.0   | 0.014 0~0.240 0(66.3)                         | 20.0  | 0.001 0~0.013 0(89.4)                         | 0.0   | 0.014 0~0.056 0(36.9)                         | 0.0   |
| 四 宜宾市 | 0.001 6~0.049 0(95.6)                         | 0.0   | 0.006 2~1.110 0(85.4)                         | 65.0  | 0.011 0~0.250 0(56.7)                         | 60.0  | 0.005 0~0.260 0(110.8)                        | 0.0   |
| 川 泸州市 | 0.001 0~0.007 0(44.9)                         | 0.0   | 0.040 0~0.370 0(65.7)                         | 30.0  | 0.030 0~0.240 0(63.1)                         | 75.0  | 0.180 0~0.300 0(15.0)                         | 0.0   |
| 省 乐山市 | 0.004 0~0.043 0(109.3)                        | 0.0   | 0.003 0~0.180 0(87.3)                         | 24.0  | 0.007 0~0.110 0(106.0)                        | 20.0  | 0.021 0~0.280 0(95.2)                         | 0.0   |
| 平均值   | 0.005 8(91.0)                                 | 0.0   | 0.190 0(108.1)                                | 46.0  | 0.059 0(86.5)                                 | 45.3  | 0.100 0(100.4)                                | 0.0   |
| 湖 浏阳市 | 0.031 0~0.048 0(18.2)                         | 0.0   | 0.006 0~0.091 0(66.7)                         | 0.0   | 0.021 0~0.041 0(30.3)                         | 0.0   | 0.018 0~0.230 0(87.3)                         | 0.0   |
| 南 益阳市 | 0.001 0~0.110 0(140.5)                        | 14.2  | 0.003 0~0.180 0(64.3)                         | 9.7   | 0.001 0~0.170 0(12.3)                         | 19.5  | 0.005 0~0.480 0(141.6)                        | 0.0   |
| 省 平均值 | 0.020 0(133.3)                                | 2.5   | 0.058 0(64.2)                                 | 9.3   | 0.039 0(71.9)                                 | 18.6  | 0.069 0(137.9)                                | 0.0   |

说明：超标率指的是检测超标的冬笋数目占总被检测冬笋数目的百分比；括号中数字表示各变量的变异系数

## 2.2 冬笋中重金属相关性分析

根据重金属在各省采样区冬笋中的质量分数，砷质量分数排序为湖南省>浙江省>四川省；铅、镉均为四川省>湖南省>浙江省；铬为浙江省>四川省>湖南省。由表1可知：采样区冬笋中铅质量分数高时，相应的镉元素质量分数也高，推测各地区冬笋中铅、镉质量分数间存在一定的相关性。表2表明：四川省、湖南省冬笋铅、镉质量分数之间存在极显著相关性( $P<0.01$ )，而浙江省则相关性不显著。由此推测，导致冬笋重金属质量分数差异性的因素与其产地地质条件有关，且四川省和湖南省冬笋中的铅、镉可能会存在复合污染<sup>[21]</sup>。

表2 各省冬笋中重金属质量分数相关性分析

Table 2 Correlation analysis of As, Pb, Cd and Cr contents of bamboo shoots from 3 provinces

| 采样省份 | 元素 | 相关系数     |         |          |   |
|------|----|----------|---------|----------|---|
|      |    | 砷        | 铅       | 镉        | 铬 |
| 浙江省  | 砷  | 1        |         |          |   |
|      | 铅  | 0.105    | 1       |          |   |
|      | 镉  | 0.104    | 0.075   | 1        |   |
|      | 铬  | 0.063    | 0.162*  | -0.030   | 1 |
| 四川省  | 砷  | 1        |         |          |   |
|      | 铅  | -0.041   | 1       |          |   |
|      | 镉  | -0.101   | 0.499** | 1        |   |
|      | 铬  | -0.109   | -0.094  | 0.457**  | 1 |
| 湖南省  | 砷  | 1        |         |          |   |
|      | 铅  | -0.215*  | 1       |          |   |
|      | 镉  | -0.245** | 0.302** | 1        |   |
|      | 铬  | 0.179    | -0.012  | -0.260** | 1 |

说明：\*表示在 $P<0.05$ 的水平上显著相关，\*\*表示在 $P<0.01$ 的水平上显著相关

### 2.3 冬笋中重金属单因子、综合因子污染指数评价

根据式(1)和式(2), 得到各采样区冬笋样品中重金属单因子污染指数和综合因子污染指数。由表 3 可知: 浙江省、湖南省冬笋的重金属的单因子污染指数及综合因子污染指数均未超过 1, 可见, 此 2 省冬笋中的这 4 种重金属污染程度较小。四川省冬笋砷和铬的单因子污染指数较小, 而铅和镉污染指数超过 1, 分别为 1.861 和 1.180, 综合因子污染指数是 1.444。可见铅、镉是影响四川省冬笋品质的关键性因素。

表 3 各省冬笋中重金属污染指数

Table 3 Heavy metal pollution indexes of winter bamboo shoots from 3 provinces

| 采样省份 | 单因子污染指数 $P_i$ |       |       |       | 综合因子污染指数 $P_{综}$ |
|------|---------------|-------|-------|-------|------------------|
|      | 砷             | 铅     | 镉     | 铬     |                  |
| 浙江省  | 0.196         | 0.521 | 0.438 | 0.341 | 0.453            |
| 四川省  | 0.116         | 1.861 | 1.180 | 0.200 | 1.444            |
| 湖南省  | 0.402         | 0.584 | 0.774 | 0.137 | 0.642            |
| 平均值  | 0.238         | 0.989 | 0.797 | 0.226 | 0.506            |

### 2.4 冬笋中重金属健康风险评估

依照式(3)~式(5)计算成人、儿童食用冬笋的单元素目标风险系数及高危系数。由表 4 可知: 对成人而言, 食用此 3 省冬笋目标风险系数小, 最大也仅为 0.117(湖南省), 高危系数也远低于 1; 即使按照日最大蔬菜的摄入量来摄入冬笋, 也不会造成致癌风险。相对于成人, 儿童的单一元素的目标风险系数都较大, 尤其是湖南省, 高达 0.743, 且高危系数高达 1.224; 进一步计算发现: 当儿童摄入湖南冬笋超过  $134 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 可能会引起健康风险, 因此需控制冬笋的日摄入量。本研究也证实了重金属对儿童造成的健康风险相比较成人要更大, 因此把成人、儿童区分开计算目标风险系数很有必要<sup>[22]</sup>。

表 4 各省冬笋中重金属目标风险系数

Table 4 Target hazard quotient of heavy metals in winter bamboo shoots

| 采样省份 | $Q_a$ |       |       |                        | $I_H$ | $Q_c$ |       |       |                        | $I_H$ |
|------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|-------|
|      | 砷     | 铅     | 镉     | 铬                      |       | 砷     | 铅     | 镉     | 铬                      |       |
| 浙江省  | 0.057 | 0.026 | 0.038 | $1.975 \times 10^{-4}$ | 0.121 | 0.188 | 0.086 | 0.420 | $6.536 \times 10^{-4}$ | 0.694 |
| 四川省  | 0.034 | 0.092 | 0.103 | $1.162 \times 10^{-4}$ | 0.229 | 0.111 | 0.306 | 0.340 | $3.845 \times 10^{-4}$ | 0.757 |
| 湖南省  | 0.117 | 0.029 | 0.067 | $0.794 \times 10^{-4}$ | 0.213 | 0.386 | 0.096 | 0.743 | $2.629 \times 10^{-4}$ | 1.224 |

### 2.5 单一重金属对目标风险系数的贡献率

为考察单一重金属元素对人群的目标风险系数在高危系数上的占比, 参照式(4)和式(5), 代入相关数据, 依次计算各省冬笋样品中砷、铅、镉和铬的目标风险贡献率。由图 1 可知: 四川省冬笋中各重金属对成人和儿童目标风险贡献率大小相同, 贡献率排序为镉>铅>砷>铬。浙江省和湖南省冬笋中各重金属对成人目标风险贡献率大小顺序相同, 排序为砷>镉>铅>铬; 对儿童目标风险贡献率的大小顺序

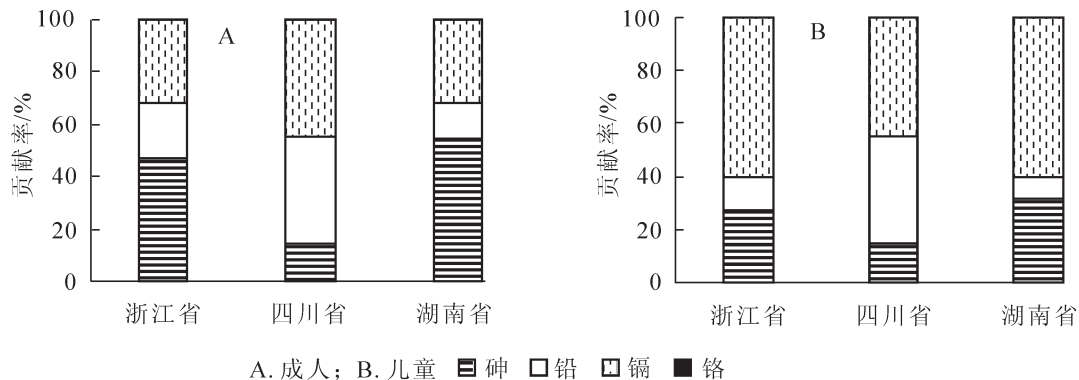


图 1 3 省冬笋中砷、铅、镉和铬目标风险系数贡献率

Figure 1 Ratios of contribution to target hazard quotient (THQ) of As, Pb, Cd and Cr in winter bamboo shoots

也相同,即镉>砷>铅>铬。综合来看,砷、铅、镉等3种元素在不同人群、不同地区中占据较大的风险贡献率,而铬元素则相对很小。

### 3 结论

测定了浙江省、四川省和湖南省冬笋样品中的铅、镉、铬及砷元素,参照标准 GB 2762-2012 和 LY/T 1777-2008 判定冬笋重金属超标情况,并对各省冬笋重金属作了单因子和综合因子污染评价,并通过重金属健康风险评估,得出以下结论:①3省冬笋样品中4种重金属的质量分数均有所超标,超标率为0.0%~46.0%。②浙江省和湖南省冬笋单因子和综合因子污染指数均小于1,冬笋受重金属污染程度小;湖南省冬笋中的铅、镉的单因子污染指数大于1,同时4种重金属的综合因子污染指数大于1,表明冬笋受4种重金属污染程度较大。③3省冬笋中4种重金属对成人的高危系数都小于1,浙江省和四川省冬笋中4种重金属对儿童的高危系数小于1,但湖南省冬笋中4种重金属对儿童高危系数超过1,成人可放心食用冬笋,但儿童应控制冬笋的摄入量。

### 4 参考文献

- [1] 陈松河,张万旗,包宇航,等.厦门市竹笋业发展现状及对策[J].现代农业科技,2015(22):316-318.  
CHEN Songhe, ZHANG Wanqi, BAO Yuhang, et al. Preliminary study on present situation and development strategies of bamboo shoot in Xiamen City [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2015(22): 316 - 318.
- [2] 杜文鹏,徐彭,刘波,等.毛冬笋化学成分研究(I)[J].中草药,2015,46(3):334-338.  
DU Wenpeng, XU Peng, LIU Bo, et al. Chemical constituents from shoots of *Phyllostachys edulis* (I) [J]. *Chin Tradit Herbal Drugs*, 2015, 46(3): 334 - 338.
- [3] 刘跃钧,王立平,傅冰,等.合江方竹和刺方竹13种不同种源方竹笋营养成分研究[J].浙江林业科技,2012,32(4):37-42.  
LIU Yuejun, WANG Liping, FU Bing, et al. Nutrition components in shoots of different provenance of *Chimonobambusa hejiangensis* and *C. pachystachys* [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2012, 32(4): 37 - 42.
- [4] 任旺,叶秀娟,李婷婷,等.麻竹笋中多酚类化合物的提取及挥发性成分分析[J].食品科学,2014,35(16):120-123.  
REN Wang, YE Xiujuan, LI Tingting, et al. Analysis of the volatile components in polyphenol compounds extracted from *Dendrocalamus latiflorus* shoots [J]. *Food Sci*, 2014, 35(16): 120 - 123.
- [5] 黄晓兵,李积华,张文华,等.毛竹冬笋不同部位营养成分及活性成分分析[J].食品科技,2014,39(8):59-63.  
HUANG Xiaobing, LI Jihua, ZHANG Wenhua, et al. Nutritional components and active ingredient analysis of different parts of winter moso bamboo shoots [J]. *Food Sci Technol*, 2014, 39(8): 59 - 63.
- [6] 周建波,李梦月,傅万四,等.竹笋培育收获及加工技术装备发展现状研究[J].竹子学报,2017,36(1):14-18.  
ZHOU Jianbo, LI Mengyue, FU Wansi, et al. The development status of cultivating, harvesting and processing technology and equipment for bamboo shoots [J]. *J Bamboo Res*, 2017, 36(1): 14 - 18.
- [7] 姜培坤,徐秋芳,罗煦钦,等.雷竹笋重金属质量分数及其与施肥的关系[J].浙江林学院学报,2004,21(4):424-427.  
JIANG Peikun, XU Qiufang, LUO Xuqin, et al. Changes in heavy metal amount of bamboo shoots of *Phyllostachys praecox* responsive to nitrogen rate [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, 21(4): 424 - 427.
- [8] 邵学新,吴明,蒋科毅.土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J].广东微量元素科学,2007,14(4):1-6.  
SHAO Xuexin, WU Ming, JIANG Keyi. Research progress in sources identification of soil heavy metal pollution [J]. *Guangdong Trace Elem Sci*, 2007, 14(4): 1 - 6.
- [9] ROY M, MCDONALD L M. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils [J]. *Land Degradation Dev*, 2015, 26(8): 785 - 792.
- [10] SHARMA R K, AGRAWAL M, MARSHALL F M. Heavy metals in vegetables collected from production and market sites of a tropical urban area of India [J]. *Food Chem Toxicol*, 2009, 47(3): 583 - 591.

- [11] 朱兰保, 盛蒂, 戚晓明, 等. 蚌埠市蔬菜重金属质量分数及食用安全性评价[J]. 食品工业科技, 2014, **35**(7): 260 – 263.  
ZHU Lanbao, SHENG Di, QI Xiaoming, *et al.* Heavy metal content and edible safety evaluation of vegetables in Bengbu [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, **35**(7): 260 – 263.
- [12] 任传义, 陈军勇, 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 Chuanyi, CHEN Junyong, ZHANG Yanping, *et al.* Assessment of heavy metals potential ecological hazards of soil and health risk of bamboo shoots [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2017, **36**(5): 855 – 862.
- [13] 蒋颖, 司马菁珂, 赵玲, 等. 上海市居民区与工业区大气颗粒物重金属生物可给性与健康风险评估[J]. 环境化学, 2016, **35**(7): 1337 – 1345.  
JIANG Ying, SIMA Jingke, ZHAO Ling, *et al.* Bioaccessibility and health risk of heavy metals in particulate matters from residential and industrial areas in Shanghai, China [J]. *Enviro Chem*, 2016, **35**(7): 1337 – 1345.
- [14] 王海萍, 秦鹏, 陈建文. 日照市部分蔬菜中铅、镉、铬、汞、砷质量分数及健康风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2016, **26**(5): 748 – 752.  
WANG Haiping, QIN Peng, CHEN Jianwen. Contents of Pb, Cd, Cr, Hg, As and health risk assessment in some vegetables in Rizhao [J]. *Chin J Health Lab Tec*, 2016, **26**(5): 748 – 752.
- [15] 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, **30**(2): 234 – 238.  
YANG Jing, ZHAO Yunli, ZHEN Quan, *et al.* Heavy metal and health risk assessment of soil and vegetable in a sewage-irrigated area [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2014, **30**(2): 234 – 238.
- [16] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 都安县玉米籽粒重金属累积特征与健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(11): 2048 – 2054.  
WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiaoyong, *et al.* Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in corn kernel in Du'an Yao Autonomous County [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2015, **34**(11): 2048 – 2054.
- [17] WANG Yirun, WANG Ruming, FAN Liyun, *et al.* Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China [J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 613 – 627.
- [18] 柳晓娟, 林爱军, 孙国新, 等. 可食植物中砷赋存形态研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(7): 1883 – 1891.  
LIU Xiaojuan, LIN Aijun, SUN Guoxin, *et al.* Arsenic speciation in edible plants: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(7): 1883 – 1891.
- [19] 朱优清, 刘增俊, 夏旭, 等. 甘蔗渣修复铬污染土壤的效果[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(4): 2568 – 2574.  
ZHU Youqing, LIU Zengjun, XIA Xu, *et al.* Effectiveness of sugarcane bagasse for decreasing chromium in soils [J]. *Chin J Environ Eng*, 2017, **11**(4): 2568 – 2574.
- [20] 戴宇, 杨重法, 郑袁明. 土壤-植物系统中铬的环境行为及其毒性评价[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3432 – 3440.  
DAI Yu, YANG Zhongfa, ZHENG Yuanming, *et al.* A review on the environmental behaviors and toxicity assessment of chromium in soil-plant systems [J]. *Environ Sci*, 2009, **30**(11): 3432 – 3440.
- [21] 聂晓玲, 程国霞, 王敏娟, 等. 陕西省 2013 年蔬菜中铅、镉污染现状及近 5 年趋势分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, **24**(14): 2063 – 2067.  
NIE Xiaoling, CHENG Guoxia, WANG Minjuan, *et al.* Analysis of lead and cadmium contamination in vegetables in Shanxi province in 2013 and its latest five-year tendency [J]. *Chin J Health Lab Tec*, 2014, **24**(14): 2063 – 2067.
- [22] 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 Dizhong, 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]. *J Agro-Environ Sci*, 2014, **33**(10): 1897 – 1903.