



贺义昌,吴妹杰,余林,等.几种重金属在不同生长部位食用竹笋中富集分布特征研究[J].江西农业大学学报,2021,43(2):279-286.

HE Y C, WU M J, YU L, et al. Enrichment and distribution of heavy metals in different growth parts of edible bamboo shoots[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(2): 279-286.

几种重金属在不同生长部位食用竹笋中富集分布特征研究

贺义昌^{1,2}, 吴妹杰², 余林², 雷小林², 李保同^{1*}, 谢谷艾^{1,2}

(1. 江西农业大学 国土资源与环境学院/江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 江西 南昌 330045; 2. 江西省林业科学院, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为了探究5种重金属在食用竹笋的不同部位和土壤富集分布规律。【方法】以江西食用竹笋及其土壤为研究对象,于江西省内的25个毛竹春笋生产基地采集竹笋及其对应的土壤样品,测定笋皮、笋尖、笋中、笋根及其土壤中Pb、Cd、Cr、As、Hg的含量,探究重金属在食用竹笋不同生长部位的富集分布特征。【结果】重金属在竹笋不同生长部位及土壤中分布存在一定的差异。Pb、Hg在笋皮中的含量最多,笋根中Cd的含量最多,在笋尖中含量最少,Pb、Cd含量从大到小依次为笋皮、笋根、笋中、笋尖、笋根、笋中、笋皮和笋尖,Cr、As在笋皮中含量最多,在笋根中含量最少,Cr、As含量从大到小依次为笋皮、笋尖、笋中和笋根;不同重金属在土壤中Pb的含量最多,Cd最少,不同重金属在土壤中的含量从大到小依次为Pb、Cr、As、Hg和Cd;竹笋各生长部位对不同重金属吸收能力差异较大,在笋皮、笋尖、可食部分、全笋中富集系数平均值大小规律相同,顺序为Cd、Cr、Hg、As和Pb,但是Pb、Cr、As、Hg、Cd富集系数均比较小,其富集能力都很弱;在笋尖-笋中间分布Cr最多,Hg最少;在笋中-笋根间Cr、As、Hg分布较多,Pb、Cd一般;在笋皮-可食部分之间,Hg的分布较少,其余重金属分布均会受到一定的阻碍。【结论】重金属在食用竹笋不同生长部位的含量分布较少,在土壤中分布含量较多,重金属在食用竹笋中各个部位富集能力较弱,因此土壤中重金属对食用竹笋的威胁较小。

关键词:食用竹笋;土壤;重金属;富集;迁移

中图分类号:S644.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2021)02-0279-08

Enrichment and Distribution of Several Heavy Metals in Different Growth Parts of Edible Bamboo Shoots

HE Yichang^{1,2}, WU Meijie², YU Lin², LEI Xiaolin², LI Baotong^{1*}, XIE Gu'ai^{1,2}

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Key Lab of Agricultural Resources and Ecology of Poyang Lake Basin, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330013, China)

收稿日期:2020-09-15 **修回日期:**2020-10-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0600103)、江西省重点研发计划项目(20171ACF60014)和江西省林业科学院青年基金项目(2019522101)

Project supported by the National Key Research and Development Plan of China (2018YFD0600103), Jiangxi Provincial Key Research and Development Program Project (20171ACF60014) and Jiangxi Academy of Forestry Youth Fund Project (2019522101)

作者简介:贺义昌, orcid.org/0000-0002-7594-2997, chang360@163.com, *通信作者:李保同,教授,博士,博士生导师,主要从事农药学、农业资源利用与保护研究, orcid.org/0000-0002-9435-4509, libt66@163.com。

Abstract: [Objective] To explore the accumulation and distribution of several heavy metals in different parts of edible bamboo shoots and soil. [Method] Taking Jiangxi edible bamboo shoots and their soil as the research object, bamboo shoots and soil samples were collected from 25 bamboo shoots production bases in Jiangxi Province. The contents of Pb, Cd, Cr, As, Hg in the bamboo shoots, shoot tips, shoots, roots and soil were determined to explore the distribution characteristics of heavy metals in different growth parts of edible bamboo shoots. [Result] The distribution of heavy metals in different growth parts of bamboo shoots and soil were different. Pb and Hg had the most content in bamboo shoots, and Cd had the most in shoot roots, however, the contents of three kinds of heavy metals in bamboo shoot tip were the least. The order of the contents of Pb and Cd was as follows: shoot skin > shoot root > shoot middle > shoot tip, shoot root > shoot middle > shoot skin > shoot tip; Cr and As were the most abundant in the shoot bark and the least in the shoot root. The order of Cr and As contents was as follows: shoot skin > shoot tip > shoot middle > shoot root. The contents of Pb and Cd were the most and the least in different heavy metals. The contents of different heavy metals in the soil from large to small were Pb > Cr > As > Hg > Cd. The absorption capacity of bamboo shoot for different heavy metals varied greatly in different growth parts. The average value of enrichment coefficient was the same in the shoot bark, shoot tip, edible part and the whole shoot, the order was as follows: Cd > Cr > Hg > As > Pb, the enrichment abilities of Pb, Cr, As, Hg, Cd were all very weak; there was the most Cr and the least Hg in the shoot tip and the middle of the shoot; Cr, As, and Hg were distributed more in the shoot and the root, while Pb and Cd were the average. Between the bamboo shoot skin and the edible part, the distribution of Hg was less, and the distribution of other heavy metals was hindered to a certain extent. [Conclusion] Heavy metals are less distributed in different growth parts of edible bamboo shoots, but more distributed in the soil. The distribution of heavy metals in different growth parts of edible bamboo shoots is small, and the accumulation capacity is weak. Therefore, heavy metals in the soil make small threat to edible bamboo shoots.

Keywords: edible bamboo shoots; soil; heavy metals; enrichment; migration

【研究意义】食用竹笋营养丰富,是抗氧化剂和生物活性化合物的潜在丰富来源,广泛分布于江西、浙江、四川、广西等地^[1]。随着人们对身体健康的越来越重视和对生活品质的追求越来越高,像食用竹笋这样富含蛋白质、纤维素、氨基酸、胡萝卜素、维生素及钙磷铁等营养物质的产品也越来越受到人们的青睐,据统计全球食用竹笋消费量以每年15%的速度递增,并且未来也将持续增长^[2-3]。然而,由于食用竹笋的需求量迅速增长,食用竹笋的生长方式也日益受到人类的干涉,包括过量使用化肥,交通量的增加和工业发展等,都极大地影响了土壤重金属的积累^[4-5]。沉积在土壤中的重金属不仅会影响食用竹笋的生长和质量,还会被富集在食物链中最终进入人体,使人们的生命安全受到威胁^[6-7]。因此,食用竹笋质量安全与人类身体健康和安全紧密相关。【前人研究进展】大量文献对竹笋及其土壤的质量安全检测与评价、竹笋高产培育技术及加工技术和竹笋的病原菌与药物防治技术等方面进行研究^[8-11]。【本研究切入点】目前,国内外对食用竹笋不同生长部位的重金属的监测鲜有报道。【拟解决的关键问题】以食用竹笋(毛竹春笋)为研究对象,测定其不同部位及其土壤中重金属砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)的含量,分析重金属在食用竹笋不同部位的迁移富集情况,以期探索食用竹笋在不同部位重金属含量规律,为判定食用竹笋重金属是否超标提供科学的理论支撑,为食用竹笋安全性评价提供精准数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

研究样品采用随机采样的方法,采集于2019年4月在江西省的8个县(市、区)的25个毛竹春笋生产基地(抚州市宜黄县、抚州市南城县、抚州市崇仁县、抚州市黎川县、抚州市南丰县、鹰潭市贵溪市、江西

省上饶市、赣州市全南县)。竹笋品种为毛竹春笋,在重金属污染区随机采集毛竹笋,竹笋剥除外壳(笋皮),切取可食部分顶端往下5 cm作为上部样品(笋尖),切取可食部分底端往上5 cm作为下部样品(笋根),切取可食部分中间部位作为中部样品(笋中)。在每个基地随机取5~10个点,每个点采集不少于1 kg非根际土壤,采集深度为0~30 cm。土壤样品采集后,在自然条件下风干,过2 mm筛并除去在土壤中的一些动植物残渣和石头。

竹笋生产基地土壤均为红壤,根据《中华人民共和国农业行业标准(NTY1121—2006)》^[12]测得各类土壤基本理化性质如下:pH值在3.8~5.1,平均值为4.5;有机质含量在5.0~80.0 g/kg,平均含量为41.6 g/kg;全氮含量在0.5~1.5 g/kg,平均含量为1.2 g/kg;碱解氮含量在30.0~200.0 mg/kg,平均含量为140.2 mg/kg;全磷含量在0.1~0.5 g/kg,平均含量为0.3 g/kg;有效磷含量在0.5~2.5 mg/kg,平均含量为2.1 mg/kg;全钾含量在10.0~25.0 g/kg,平均含量为23.1 g/kg;速效钾含量在10.0~110.0 mg/kg,平均含量为68.7 mg/kg。

1.2 测定项目及方法

毛竹春笋样品主要重金属污染物测定方法参照国家标准。本实验主要测定砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr) 5种重金属元素的含量。毛竹春笋和土壤样品分析方法见表1。

表1 毛竹春笋和土壤样品分析方法

Tab.1 Analysis methods of bamboo shoots and soil samples

序号 Number	污染物项目 Heavy metals	检测方法 Detective methods	
		竹笋 Bamboo shoots	土壤 Soils
1	砷(As)	GB 5009.11—2014	HJ 803—2016
2	汞(Hg)	GB 5009.17—2014	HJ 680—2013
3	铅(Pb)	GB 5009.12—2017	HJ 803—2016
4	镉(Cd)	GB 5009.15—2014	HJ 803—2016
5	铬(Cr)	GB 5009.123—2014	HJ 803—2016

主要仪器设备:微波消解仪(Multiwave PRO,奥地利安东帕),原子吸收分光光度仪(Z2000,日本日立),原子荧光分光光度仪(AFS-230E,北京科创海光),电感耦合等离子体质谱仪(PQMS,德国耶拿)。

主要试剂:As、Hg、Pb、Cd、Cr标准溶液(1 000 μg/mL,国家有色金属研究院),氢氧化钠、硼氢化钾、氢氧化钾、磷酸二氢铵(500 g,国药集团),抗坏血酸(500 g,阿拉丁),高纯氩气、乙炔(≥99.999%,江西国源)。

1.3 重金属富集系数及迁移系数计算

用Agoramoorthy等^[13]和Usman等^[14-15]提出的公式,计算富集系数(BCF)和迁移系数(BTF)。富集系数(BCF, F_c)来表示竹笋对重金属富集能力, F_{c1} 、 F_{c2} 、 F_{c3} 、 F_{c4} 、 F_{c5} 、 F_{c6} 分别表示笋皮、笋尖、笋中、笋根、可食部分(笋尖+笋中+笋根)、全笋(笋皮+可食部分)的重金属富集能力。当 $F_c > 1$ 时,说明竹笋富集重金属的能力较强^[16]。用计算公式:公式(1)。

$$F_{c1} = C_p \text{ 笋皮} / C_s \quad (1)$$

$$F_{c2} = C_p \text{ 笋尖} / C_s \quad (2)$$

$$F_{c3} = C_p \text{ 笋中} / C_s \quad (3)$$

$$F_{c4} = C_p \text{ 笋根} / C_s \quad (4)$$

$$F_{c5} = (C_p \text{ 笋尖} + C_p \text{ 笋中} + C_p \text{ 笋根}) / C_s \quad (5)$$

$$F_{c6} = (C_p \text{ 笋皮} + C_p \text{ 笋尖} + C_p \text{ 笋中} + C_p \text{ 笋根}) / C_s \quad (6)$$

式(1)中, C_p 笋皮、 C_p 笋尖、 C_p 笋中、 C_p 笋根分别为竹笋的笋皮、笋尖、笋中、笋根中重金属含量, mg/kg; C_s 为土壤中重金属含量, mg/kg。

用迁移系数(BTF, F_T)来表示竹笋中重金属迁移能力,用 F_{T1} 、 F_{T2} 、 F_{T3} 分别表示笋根-笋中、笋中-笋尖、笋皮-可食部分的迁移能力。当 $F_T > 1$ 时,说明竹笋体内运输重金属的能力很强;当 $F_T > 0.5$ 时,说明竹笋体内运输重金属的能力一般^[17]。计算公式:公式(7)~(9)。

$$F_{T1}=C_p \text{ 笋中}/C_p \text{ 笋根}$$

(7)

$$F_{T2}=C_p \text{ 笋尖}/C_p \text{ 笋中}$$

(8)

$$F_{T3}=C_p \text{ 笋皮}/(C_p \text{ 笋尖}+C_p \text{ 笋中}+C_p \text{ 笋根})$$

(9)

1.4 数据处理

数据处理与分析采用 Excel 2019 和 Origin 2018 制图,利用 SPSS Statistics 22.0 软件进行差异显著性分析,显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 竹笋不同生长部位及土壤中重金属分布特征

25 个毛竹生产基地的竹笋不同生长部位及土壤中重金属含量分布情况见表 2。同一重金属在竹笋各部位中含量分布不同。Pb、Hg 在笋皮中的含量最高,但与笋尖、笋中、笋根无显著差异;笋根中 Cd 的含量最高,显著多于笋皮、笋尖、笋中;Cr、As 规律一致,从大到小依次为笋皮、笋尖、笋中和笋根,而竹笋各部位的 Cr 含量差异不显著,笋皮中 As 含量显著高于笋尖、笋中、笋根,笋尖中 As 含量与笋中差异不显著(表 2)。

从表 2 中可以看出,不同重金属在土壤中的含量是不同的,从大到小依次为 Pb、Cr、As、Hg 和 Cd。在竹笋可食部分(笋尖+笋中+笋根),不同重金属的含量有所不同,其中 Cr 含量最高,其次是 Pb、Cd、As、Hg(表 2)。不同重金属在竹笋不同生长部位的含量分布也有所差异。其中,在笋皮和笋尖中规律一致,从大到小依次为 Cr、Pb、As、Cd 和 Hg;在笋中和笋根中规律一致,Cr 含量最高,Hg 含量最低(表 2)。此外,Hg 在竹笋各部位中的含量明显低于其他重金属,可能是由于 Hg 在土壤中的含量较低和竹笋中的富集能力较弱 2 个因素导致的。同时,竹笋各部位中重金属含量与土壤中的规律有一定差异,可能是由于不同重金属的迁移能力不同。因此,土壤中重金属含量和重金属本身的富集迁移能力,是影响竹笋中重金属含量的因素,这与前人的研究结论一致^[18-19]。

表 2 竹笋不同生长部位及土壤中重金属含量分布
Tab.2 Distribution of heavy metal content in different growing parts of bamboo shoots and soil mg/kg

采样点 Sampling point	Pb	Cd	Cr	As	Hg
笋皮 Shoot skin	0.067 1±0.007 0 ^b	0.008 9±0.002 0 ^c	0.790 3±0.007 5 ^b	0.025 2±0.000 9 ^b	0.003 1±0.000 1 ^b
笋尖 Shoot tip	0.030 4±0.001 9 ^b	0.008 3±0.000 2 ^c	0.649 0±0.007 9 ^b	0.010 4±0.000 9 ^c	0.000 7±0.000 2 ^b
笋中 Shoot middle	0.035 6±0.001 9 ^b	0.010 1±0.000 2 ^c	0.121 4±0.001 6 ^b	0.008 1±0.000 9 ^{c-d}	0.001 0±0.000 1 ^b
笋根 Shoot root	0.046 5±0.003 1 ^b	0.013 4±0.000 9 ^b	0.097 6±0.000 2 ^b	0.007 2±0.000 9 ^d	0.000 9±0.000 2 ^b
土壤 Soil	36.579 5±2.140 6 ^a	0.144 2±0.000 8 ^a	35.088 1±2.116 7 ^a	4.317 0±0.002 4 ^a	0.169 5±0.003 7 ^a

同一列数据后小写字母不同表示不同采样点重金属含量差异达 5% 显著水平,下同
The difference in lowercase letters after the same column of data indicates that the difference in the content of heavy metals in different sampling points reaches a significant level of 5%, the same below

2.2 竹笋不同生长部位中重金属富集能力

竹笋各部位积累重金属在一定程度上受土壤重金属含量影响(表 3)。竹笋各生长部位对不同重金属吸收能力差异较大,在笋皮、笋尖、可食部分、全笋中富集系数平均值大小规律相同,由大到小依次为 Cd、Cr、Hg、As 和 Pb,其中笋皮中 Cr 与 Hg 富集能力平均值差异不显著,笋尖中 Hg 与 As 差异不显著。在竹笋的笋皮、笋尖、笋中、笋根、可食部分和全笋中 As 与 Pb 之间的差异均不显著,而 Cd 与 Cr、Hg、As、Pb

均有显著差异。从表3中还可以看出,笋中富集能力(F_c)由大到小依次为Cd、Hg、Cr、As和Pb,其中Cd最强,其 F_{c3} 在0.003 6~0.281 4,平均值为0.070 1;其次是Hg和Cr,其 F_{c3} 范围分别为0.007 1~0.032 4和0.000 1~0.050 1,平均值分别为0.005 7和0.003 5;而As和Pb富集能力最弱。此外,Pb、Cd、Cr、As、Hg在竹笋的笋皮、笋尖、笋中、笋根、可食部分和全笋中的富集系数 F_c 远小于1,由此说明Pb、Cd、Cr、As、Hg富集能力很弱。

表3 竹笋不同生长部位重金属富集系数(F_c)

Tab.3 Enrichment coefficients of heavy metals in different growing parts of bamboo shoots

重金属 Heavy metals	F_{c1}	F_{c2}	F_{c3}	F_{c4}	F_{c5}	F_{c6}
Pb	0.001 8±0.000 2 ^d	0.000 8±0.000 1 ^d	0.001 0±0.000 1 ^d	0.001 3±0.000 1 ^b	0.003 1±0.000 1 ^d	0.004 9±0.000 2 ^d
Cd	0.061 6±0.014 0 ^a	0.057 6±0.001 5 ^a	0.070 1±0.001 1 ^a	0.092 8±0.006 3 ^a	0.220 5±0.008 5 ^a	0.282 1±0.006 8 ^a
Cr	0.022 5±0.000 2 ^b	0.018 5±0.000 2 ^b	0.003 5±0.000 1 ^c	0.002 8±0.000 1 ^b	0.024 7±0.000 3 ^b	0.047 3±0.000 5 ^b
As	0.005 8±0.000 2 ^{cd}	0.002 4±0.000 2 ^{cd}	0.001 9±0.000 2 ^d	0.001 7±0.000 2 ^b	0.005 9±0.000 5 ^d	0.011 8±0.000 5 ^d
Hg	0.018 1±0.000 6 ^{bc}	0.004 0±0.001 2 ^c	0.005 7±0.000 5 ^b	0.005 2±0.001 3 ^b	0.014 9±0.002 4 ^c	0.033 0±0.002 7 ^c

2.3 竹笋不同生长部位中重金属迁移能力

竹笋的不同生长部位中不同重金属迁移能力有一定的差异。从表4可知,笋中与笋根间迁移能力(F_{T1})由大到小依次为Hg、As、Cr、Pb和Cd,其中Hg、As、Cr的 F_T 均大于1,说明笋中与笋根间重金属的迁移能力很强;而Pb和Cd的 F_T 分别为0.772 2和0.758 8,迁移能力一般。笋中与笋尖间的迁移能力(F_{T2})由大到小依次为Cr、As、Pb、Cd和Hg,其中Cr的 F_{T2} 值最大,为5.344 8,即迁移能力最强;其次As的 F_{T2} 值为1.298 0,迁移能力很强;最后Pb、Cd、Hg的 F_{T2} 值分别为0.854 9、0.822 4、0.699 6,迁移能力一般。笋皮与可食部分的迁移能力(F_{T3})由大到小依次为Hg、As、Cr、Pb和Cd,其中Hg的 F_{T3} >1,说明迁移能力很强;As、Cr的 F_{T3} 值分别为0.989 1、0.910 4,迁移能力一般;而Pb、Cd的 F_{T3} 值分别为0.596 5、0.282 0,迁移能力很弱。

表4 竹笋各部位重金属迁移系数(F_T)

Tab.4 Heavy metal migration coefficients of bamboo shoots

迁移系数 Migration coefficient	Pb	Cd	Cr	As	Hg
F_{T1}	0.772 2±0.095 2 ^a	0.758 8±0.041 7 ^a	1.244 6±0.018 6 ^b	1.135 5±0.047 0 ^{ab}	1.139 9±0.165 2 ^{ab}
F_{T2}	0.854 9±0.038 7 ^a	0.822 4±0.019 6 ^a	5.344 8±0.018 2 ^a	1.298 0±0.158 8 ^a	0.699 6±0.224 9 ^b
F_{T3}	0.596 5±0.060 1 ^b	0.282 0±0.071 7 ^b	0.910 4±0.001 2 ^c	0.989 1±0.099 9 ^b	1.247 2±0.183 0 ^a

2.4 竹笋不同生长部位及土壤中重金属迁移特征

Cr是动物和人体必不可少的微量营养素之一,但进入植物体内,会对植物造成一定的危害,其在竹笋及土壤中的分布特征由大到小顺序依次为土壤、笋皮、笋尖、笋中和笋根,迁移系数由大到小依次为 F_{T2} 、 F_{T1} 和 F_{T3} ,且 F_T 之间差异显著。土壤中Cr含量是笋皮的44.40倍,表现为很弱的富集作用;而笋尖中Cr含量是笋中的5.35倍,笋中Cr含量是笋根的1.21倍,均表现出很强的富集作用,其 F_{T2} 和 F_{T1} 高达5.344 8和1.244 6,说明Cr进入竹笋体内后在笋尖-笋中、笋中-笋根的传输非常通畅。此外, F_{T3} 为0.910 4,说明笋皮与可食部分的传输也比较通畅。由此可见,竹笋对土壤中的Cr的富集能力较弱,而Cr进入竹笋体内后迁移能力较强。

As对植物生长有一定的危害,其在竹笋及土壤中的分布特征从高到低依次为土壤、笋皮、笋尖、笋中和笋根,迁移系数由大到小依次为 F_{T2} 、 F_{T1} 和 F_{T3} ,除 F_{T2} 和 F_{T3} 差异显著,其余 F_T 间差异均不显著。笋皮中As含量仅是土壤中的0.58%,说明富集能力很弱。而 F_{T1} 和 F_{T2} 均大于1,表现为较强的富集能力,体现出As在笋中-笋根、笋尖-笋中的传输非常通畅; F_{T3} 为0.989 1,说明笋皮与可食部分的传输也比较通畅。因此,竹笋对土壤中的As的富集能力较弱,而As进入竹笋体内后迁移能力较强。

Hg是对生物体毒性很高的元素,其在竹笋及土壤中的分布特征从大到小依次为土壤、笋皮、笋中、笋根和笋尖,迁移系数由大到小依次为 F_{T3} 、 F_{T1} 和 F_{T2} ,除 F_{T2} 和 F_{T3} 差异显著,其余 F_T 间均无显著差异。Hg在笋中-笋根、笋皮与可食部分的传输非常通畅,其 F_{T1} 和 F_{T3} 分别为1.139 9和1.247 2; F_{T2} 仅为0.699 6,因而对笋尖吸收Hg有一定的阻碍作用。

Pb、Cd都是对生物体有毒性的元素,其在竹笋及土壤中的分布特征由大到小依次为土壤、笋皮、笋根、笋中、笋尖,迁移系数由大到小依次为 F_{T2} 、 F_{T1} 和 F_{T3} , F_{T1} 与 F_{T2} 之间无显著性差异。迁移系数在0.282 0~0.854 9,说明笋中-笋根、笋尖-笋中及笋皮-可食部分都会在一定程度上阻止竹笋对土壤中Pb、Cd的吸收,而 F_{T3} 分别为0.596 5、0.282 0,显著低于 F_{T1} 、 F_{T2} ,表明阻止竹笋对Pb、Cd吸收的主要界面为笋皮-可食部分。

3 结论与讨论

土壤中的重金属迁移过程实质是重金属的化学形态发生转化的过程,然而,重金属化学形态受到土壤pH值、有机质及阳离子交换量等土壤理化性质的影响^[18]。

重金属在竹笋不同生长部位及土壤中分布有一定的差异。Pb、Cd含量从大到小依次为笋皮、笋根、笋中、笋尖,笋根、笋中、笋皮和笋尖,表现为自笋根至笋尖逐渐下降的趋势,这与黄安香等^[20]研究结果一致。由于植物对重金属的吸收和富集主要通过吸附在根的外围,转运进根系;再通过根系继续向上运输;随着时间的推移,笋皮分配比例会逐渐增大^[21]。Cr、As含量顺序由大到小依次为笋皮、笋尖、笋中和笋根,表现出从笋根至笋尖逐渐上升的趋势,有研究表明植物对土壤中重金属的吸收量与土壤pH之间呈负相关^[22-23]。本研究中竹笋采集地的土壤都是偏酸性,由于笋根对重金属的吸收量较少,而Cr、As在竹笋中的迁移能力较强,所以导致竹笋自上而下Cr、As含量呈下降趋势。Hg的含量由大到小依次为笋皮、笋中、笋根和笋尖,由于阻碍竹笋对Hg吸收的主要界面为笋尖-笋中,所以导致笋尖中Hg的含量最少。竹笋对不同重金属的吸收有所不同,可能因为土壤中多种元素共存而引起的拮抗或协同作用导致的^[24]。

富集系数和迁移系数是衡量植物与植物器官对重金属的累积能力和迁移情况的指标,富集系数越高,富集能力越强,迁移系数越大,根系吸收的重金属迁移到地上器官的量越少,即迁移能力越弱^[25]。植物种类也会影响植株对土壤中不同重金属吸收能力^[26]。本研究中竹笋对土壤中不同重金属吸收能力存在差异,但在笋皮、笋尖、可食部分、全笋中富集系数平均值大小规律相同,由大到小依次为Cd、Cr、Hg、As和Pb,即Cd最强,Pb最弱,并且由于 F_c 均远小于1,故竹笋对Pb、Cd、Cr、As、Hg的富集能力很弱。不同重金属在竹笋不同生长部位的迁移能力也有所不同,其中在笋尖-笋中间Cr的迁移能力最强,Pb、Cd一般,Hg在其间的运输存在一定的阻碍,表现为迁移能力最弱;在笋中-笋根间Cr、As、Hg迁移能力较强,Pb、Cd一般;在笋皮-可食部分之间,Hg的传输非常通畅,迁移能力较强,其余较弱,其中Cd最弱。竹笋不同生长部位吸收重金属的能力不同,可能与元素基本性质有关,同时也反映出污染源不同,土壤和大气是植物摄取某些重金属如Pb、Cd、Cr、As、Hg等的重要场所,在大气污染严重的地区,土壤污染可能不是农产品安全的最大威胁^[27-28]。

综上,重金属在食用竹笋不同生长部位的富集和迁移能力都较弱,因此土壤中重金属对食用竹笋的威胁较小。

参考文献 References:

- [1] SATYA S, SINGHAL P, BAL L M, et al. Bamboo shoot: a potential source of food security[J]. Mediterranean journal of nutrition and metabolism, 2012, 5(1): 1-10.
- [2] 张延平, 陈振超, 汤富彬, 等. 浙、川、湘毛竹主产区冬笋重金属质量分数及健康风险评估[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(4): 635-641.
ZHANG Y P, CHEN Z C, TANG F B, et al. Content and risk assessment of heavy metals in winter shoots of *Phyllostachys edulis* from Zhejiang, Sichuan, and Hunan Provinces[J]. Journal of Zhejiang agriculture and forestry university, 2018, 35(4): 635-641.

- [3] 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 J B, LI M Y, FU W S, et al. The development status of cultivating, harvesting and processing technology and equipment for bamboo shoots[J]. Journal of bamboo research, 2017, 36(1): 14-18.
- [4] WANG F, ZHAO W J, CHEN Y Y. Spatial variations of soil heavy metal potential ecological risks in typical moso bamboo forests of southeast China[J]. Bulletin of environmental contamination & toxicology, 2019, 102, 224-230.
- [5] TANG X L, XIA M P, GUAN F Y, et al. Spatial distribution of soil nitrogen, phosphorus and potassium stocks in moso bamboo forests in subtropical China[J]. Forests, 2016, 7(11), 267.
- [6] FU J J, ZHANG A Q, WANG T, et al. Influence of e-waste dismantling and its regulations: temporal trend, spatial distribution of heavy metals in rice grains, and its potential health risk[J]. Environmental science & technology, 2013, 47(13): 7437-7445.
- [7] LI Z Y, MA Z W, KUIJP T J V D, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. Science of the total environment, 2013, 468-469: 843-853.
- [8] 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 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.
- [9] 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 M, NI Z L, MO R H, 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.
- [10] 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 agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(2): 308-315.
- [11] ARA M T, NOMURA T, KATO Y, et al. A versatile liquid culture method to control the in vitro development of shoot and root apical meristems of bamboo plants[J]. American journal of plant sciences, 2020, 11(2): 262-275.
- [12] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 NT/Y 1121-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Ministry of Agriculture of the PRC. Agriculture industry standards of the PRC NT/Y 1121-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [13] AGORAMOORTHY G, CHEN F A, HSU M J. Threat of heavy metal pollution in halophytic and mangrove plants of Tamil Nadu, India[J]. Environmental pollution, 2008, 155(2): 320-326.
- [14] USMAN A R A, ALKREDAA R S, AL-WABEL M I. Heavy metal contamination in sediments and mangroves from the COAST OF RED SEA: AVICENNIA MARINA AS potential metal bioaccumulator[J]. Ecotoxicology & environmental safety, 2013, 97(1): 263-270.
- [15] USMAN A R A, LEE S S, AWAD Y M, et al. Soil pollution assessment and identification of hyperaccumulating plants in chromated copper arsenate (CCA) contaminated sites, Korea[J]. Chemosphere, 2012, 87(8): 872-878.
- [16] 白利勇,季慧慧,孙文轩,等.粉煤灰中重金属Pb/Cr/Cu在土壤-小白菜中的迁移与形态转化[J].土壤学报, 2019, 56(3): 682-692.
BAI L Y, JI H H, SUN W X, et al. Morphological transformation and migration of heavy metals (Pb, Cr and Cu) in coal ash applied to the soil-Chinese cabbage system[J]. Acta pedologica Sinica, 2019, 56(3): 682-692.
- [17] 严莉,李龙山,倪细炉,等.5种湿地植物对土壤重金属的富集转运特征[J].西北植物学报, 2016, 36(10): 2078-2085.
YAN L, LI L S, NI X L, et al. Accumulation of soil heavy metals in five species of wetland plants[J]. Acta botanica boreali-occidentalia Sinica, 2016, 36(10): 2078-2085.
- [18] REN Z L, TELLA M, BRAVIN M N, et al. Effect of dissolved organic matter composition on metal speciation in soil solutions[J]. Chemical geology, 2015, 398, 61-69.
- [19] 茹淑华,徐万强,侯利敏,等.连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J].生态环境学报, 2019, 28(10): 2070-2078.
RU S H, XU W Q, HOU L M, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration

- of heavy metals in soil-crop systems[J]. *Ecology and environmental sciences*, 2019, 28(10): 2070-2078.
- [20] 黄安香, 姚加加, 姬宁, 等. 楠竹笋对土壤中铅和镉的吸收特征分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(21): 41-47.
- HUANG A X, YAO J J, JI N, et al. Absorption characteristics analysis of Pb and Cd from soil by *phyllostachys pubescens* shoots[J]. *Science and technology of food industry*, 2018, 39(21): 41-47.
- [21] 李清报, 罗样熙, 杨良. 土壤作物生态系统中的铅镉污染影响研究[J]. *云南环境科学*, 2002, 21(2): 10-11.
- LI Q B, LUO Y X, YANG L. Study on the influence of lead and cadmium pollution in soil crop ecosystem[J]. *Yunnan environmental science*, 2002, 21(2): 10-11.
- [22] 谭玲. 菜心 Cd 低累积品种对 Cd、Pb、Cr 多种重金属的吸收特性[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- TAN L. Uptake of Cd, Pb and Cr by Chinese flowering cabbage cultivars with low Cd accumulation[D]. Guangzhou: Jinnan University, 2014.
- [23] 靳省飞, 鲁为华, 王旭哲, 等. 不同浓度猪粪水对两种植物重金属富集及迁移效应的影响[J]. *家畜生态学报*, 2020, 41(4): 52-58.
- JIN X F, LU W H, WANG X Z, et al. Accumulation and translocation of heavy metals in two plants irrigated with different concentrations of pig manure water[J]. *Journal of domestic animal ecology*, 2020, 41(4): 52-58.
- [24] RASHID M H, FARDOUS Z, CHOWDHURY M A Z, et al. Determination of heavy metals in the soils of tea plantations and in fresh and processed tea leaves: an evaluation of six digestion methods[J]. *Chemistry central journal*, 2016, 10(1): 7-7.
- [25] 庞荣丽, 王书言, 王瑞萍, 等. 重金属在土壤-葡萄体系中的富集和迁移规律[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(4): 109-115.
- PANG R L, WANG S Y, WANG R P, et al. Study on the enrichment and migration characteristics of heavy metals in soil-grapevine system[J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2019, 35(4): 109-115.
- [26] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6): 774-779.
- YANG W W, LIU M, CAO M Z, et al. Accumulation and transfer of lead (Pb) and cadmium (Cd) on different species of maize[J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2014, 30(6): 774-779.
- [27] ANGELOVA V R, IVANOV A, BRAIKOV D. Heavy metals (Pb, Cu, Zn and Cd) in the system soil-grapevine-grape[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 1999, 79(5): 713-721.
- [28] 王小玲, 刘腾云, 幸学俊, 等. 6个水稻品种对 Cr、As、Zn、Pb 和 Cu 吸收积累的差异性[J]. *江西农业大学学报*, 2016, 38(6): 1009-1016.
- WANG X L, LIU T Y, XING X J, et al. Differences in the uptake and accumulation of Cr, As, Zn, Pb and Cu from soil among six rice cultivars[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2016, 38(6): 1009-1016.