

研究报告

广西主产区麻竹笋及其产地土壤重金属含量分析

栾洁,陈桂丹,莫雯霞,蒙芳慧,李坤,陈松武

(广西壮族自治区林业科学研究院,广西南宁 530002)

摘要:目的 了解广西麻竹主产区麻竹笋及产地土壤重金属的含量情况,分析其分布特征。方法 在广西南宁市、桂林市、柳州市和百色市4个麻竹主产区共采集麻竹笋115份,麻竹笋产地土壤样品115份,检测麻竹笋和土壤样品中砷、汞、镉、锰、钡、镍、铜、铬、铅和钛10种重金属元素含量,用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法分析产地土壤重金属污染情况,并探讨麻竹笋中重金属与产地土壤重金属之间的相关性以及富集系数(BCF)。结果 115份麻竹笋样品中所有重金属含量均未超出限量值,产地土壤样品中,镉、砷、铬和镍分别有16.5%、3.5%、0.9%和1.7%超出标准规定的风险筛选值,汞、铅、铜元素均未超出风险筛选值,表明麻竹笋主产区土壤未见明显的重金属污染。麻竹笋中各重金属元素含量与对应产地土壤重金属元素含量之间存在多种复杂相关关系,麻竹笋对重金属的富集能力普遍较弱($BCF < 0.05$),仅铜、镉相对高于其他元素。结论 麻竹笋中的重金属含量均未超出国家相关标准规定的限量值,其食用风险低,产地土壤未见明显重金属污染,麻竹笋中重金属与产地土壤重金属含量之间存在多种复杂相关关系。

关键词: 重金属; 产地土壤; 麻竹笋; 相关性

中图分类号: R155 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8456(2025)07-0595-10

DOI: 10.13590/j.cjfh.2025.07.001

Characterization of heavy metal content in soil of dendrocalamus latiflorus and their origins in the main production areas of Guangxi

LUAN Jie, CHEN Guidan, MO Wenxia, MENG Fanghui, LI Kun, CHEN Songwu
(Guangxi Forestry Research Institute, Guangxi Nanning 530002, China)

Abstract: Objective To investigate the content of heavy metals in dendrocalamus latiflorus and soil of origin in the main production areas of dendrocalamus latiflorus in Guangxi, and to analyse their distribution characteristics. **Methods** A total of 115 soil samples of dendrocalamus latiflorus and 115 samples of dendrocalamus latiflorus were collected in the four main dendrocalamus latiflorus production areas of Nanning, Guilin, Liuzhou and Baise in Guangxi. As, Hg, Cd, Mn, Ba, Ni, Cu, Cr, Pb and Ti as 10 heavy metal elements in dendrocalamus latiflorus and soil samples were analyzed. The pollution of heavy metals in soil of origin was analyzed by the single-factor pollution index method and the Nemeró composite pollution index method, and the correlation between heavy metals in jatropha dendrocalamus latiflorus and heavy metals in soil of origin and bioconcentration factor (BCF) was explored. **Results** All heavy metals in 115 dendrocalamus latiflorus samples did not exceed the limit values. In the soil samples from the production area, 16.5%, 3.5%, 0.9% and 1.7% of Cd, As, Cr and Ni respectively exceeded the risk screening values specified in the standard, while the elements Hg, Pb and Cu did not exceed the risk screening values, and the contamination index indicated that there was no obvious heavy metal contamination of the soil in the main production area of dendrocalamus latiflorus. The results of the correlation analysis showed that there were various complex correlations between the contents of each heavy metal element in dendrocalamus latiflorus and the contents of heavy metal elements in the soil of the corresponding origin. Jatropha shoots were generally weakly enriched for heavy metals ($BCF < 0.05$), with only Cu and Cd being relatively higher than the other elements. **Conclusion** None of the heavy metal contents in dendrocalamus latiflorus exceeded the limit values, and no obvious heavy metal contamination was seen in the soil of the origin, and there were many complex correlations between the heavy metals in dendrocalamus latiflorus and the heavy metal contents in the soil of the origin.

收稿日期:2025-05-19

基金项目:广西林业科技推广示范项目(2023GXJK27)

作者简介:栾洁 女 高级工程师 研究方向为林产品质量提升 E-mail: 786448419@qq.com

通信作者:陈松武 男 正高级工程师 研究方向为木材加工技术 E-mail: 291961165@qq.com

Key words: Heavy metal; planting soil; dendrocalamus latiflorus; correlation

竹是一种多年生、常绿植物,属于禾本科竹亚科^[1]。迄今为止,世界各地已报道竹子有1250种,其中麻竹为优良的笋材两用竹种,原产于广西、福建、云南、广东和贵州等地区,是我国南方地区栽培最广的竹之一^[2]。广西是中国重要的竹笋产区,截至2023年底,广西麻竹种植面积达40万亩,主要分布在桂林、柳州、百色、贵港等市,其生长快速、萌发能力强、出笋率高且笋期长,是柳州螺蛳粉及广西其他米粉的重要原料。然而,随着对竹笋需求的增加,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,都可能造成竹笋土壤的重金属污染。重金属是环境中的一类外源污染物,其具有持久性、不可降解性、潜在毒性以及生物蓄积性而在全球引起广泛关注^[3-6]。根据重金属可能产生的一系列危害,美国环保署将砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)列为优先控制污染物^[7,8]。广西地区土壤重金属总体污染较为严重,研究表明土壤重金属污染与地质作用密切相关,广西主要以喀斯特地貌为主,石灰岩风化形成的土壤中重金属含量非常富集^[9]。

竹类植物对金属环境具有较强的适应能力并拥有一定的重金属吸收能力,极大地增加重金属在竹类植物中的累积^[10]。根据世界卫生组织、中华人民共和国生态环境部和美国环境保护局的研究,沉积在土壤中的重金属过度积累会破坏土壤质量,影响竹笋的生长和质量,还会通过食物链在人体内蓄积,威胁人体健康^[11-14]。由此可见,竹笋质量安全与人类身体健康和安全紧密相关。因此,研究竹笋及其产地土壤的重金属含量对促进竹笋产业的健康发展和保证竹笋品质及食品安全具有重要意义。

本研究对广西4个麻竹主产区麻竹笋和产地土壤中As、Hg、Cd、Mn、Ba、Ni、Cu、Cr、Pb和Ti 10种重金属含量进行检测,通过单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法对土壤重金属污染情况展开评价,并分析富集系数(Bioconcentration factor, BCF)和产地土壤与麻竹笋中重金属之间的相关性。此前,根据全国第一次土壤污染详查资料,广西表层土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn分别是全国表层土壤的2.0、4.5、1.6、1.1、2.6、1.3、1.4和1.4倍,是我国典型的重金属地质高背景区,基于广西土壤重金属高背景值的研究已有相关报道,同时对麻竹笋中重金属含量的分析也已有较多报道,但基于广西特殊的喀斯特地貌造成的土壤重金属高背景值对

麻竹笋中重金属元素含量的影响还鲜有人研究。本研究为麻竹笋重金属的质量控制提供数据支撑,从而促进竹笋产业健康高质量的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区概况

广西地处低纬度,属亚热带季风性气候,光热充足,夏季漫长且高温多雨,冬季短促而温暖少雨,使得麻竹笋生长周期兼顾持续性与季节性。根据各个主产区麻竹笋的种植面积及地理环境,选择种植面积较大且周边环境影响因素稳定的样地。本实验所研究的麻竹笋及其产地土壤样品主要采集于广西南宁市、桂林市永福县、柳州市、百色市田林县这4个麻竹笋主产区。南宁采样点地理坐标为108°0′-108°40′E, 22°31′-22°58′N,海拔为90.9~186.3 m,邕宁区为南宁市区麻竹核心产区,种植面积占全市50%以上,规模化种植基地集中,样本代表性高;高峰林场为自治区直属国有林场,拥有高标准麻竹示范地。柳州市采样点地理坐标为109°8′-109°27′E, 24°20′-24°41′N,海拔为94.8~484 m,柳城县麻竹种植面积超8万亩,占柳州总量的60%,柳南区为竹笋加工企业聚集区。桂林市采样点地理坐标为109°54′-109°59′E, 24°55′-25°59′N,海拔为138.8~172.2 m,永福县麻竹笋种植面积3.2万亩,占桂林总量的61.5%。百色田林县麻竹种植面积2.1万亩,占百色市的40%以上,位于珠江上游水源涵养区,工业污染源稀少,土壤重金属本底值接近自然背景水平,采样点地理坐标为106°2′-106°14′E, 24°3′-24°10′N,海拔为278.4~592.5 m。

1.1.2 样品采集

在2024年6~8月麻竹笋成熟期,在选定的每个主产区中根据种植面积大小共设置25~35个采样点,一般100亩设置3~5个点,尽量覆盖每个主产区的竹笋主产地,同时避开边缘区域(如公路和工厂旁)和异常区域(近期施用化肥或发生污染地块),避免其他因素的影响。同步采集麻竹笋及其产地土壤样品,采样信息如表1所示。

表1 采样点分布

Table 1 Distribution of sampling points

采样区域	采样点数/个	树龄范围/年	品种	海拔高度/m
南宁市	25	4~6	麻竹笋	90.9~186.3
桂林永福县	25	5	麻竹笋	136.5~179.6
柳州市	30	2~5	麻竹笋	94.8~484.1
百色田林县	35	3~4	麻竹笋	261.0~592.5

利用随机采样法采集麻竹样品,每个麻竹笋样品的采集量不少于 1.5 kg,样品采集后装入自封袋并及时送至实验室。剥去笋壳,用蒸馏水清洗麻竹笋表面附着的泥土,将可食部分置于食品粉碎机中充分磨碎至细腻糊状,颗粒均匀无明显纤维结块及大颗粒残留,磨碎后的样品装入塑料瓶密封,并冷冻保存待测。同时,在每个麻竹笋采样点对应的土壤区域,采用“S”形布点法采集土壤样品,每个点采集 5 个 10~20 cm 深度的土壤样品,同一采样点的土壤样品混合成一个约 1 kg 的混合样品,带回实验室。土壤样品运回实验室后,进行风干、研磨、过筛处理,随后装入塑料瓶中,常温干燥保存待测。

1.2 方法

1.2.1 检测方法

麻竹笋样品中重金属的含量测定所依据的标准是 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》和 GB 5009.17—2021《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》,用花粉(GBW10026)作质控样,采用电感耦合等离子体质谱仪和原子荧光光度计对样品进行测定。

土壤样品中 Hg 元素的测定是参考 8《土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定》(GB/T 22105.1—2008),As 元素的测定是参考《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定》(GB/T 22105.2—2008);土壤中其他元素测定参考《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803—2016),用土壤成分分析标准物质(GBW07453)作质量控制对照样,采用电感耦合等离子体质谱仪和原子荧光光度计对样品进行测定。此外,将风干后土壤过 2 mm 筛,按照 LY/T 1239—1999《森林土壤 pH 值的测定》测定其 pH 值。

1.2.2 评价标准与方法

1.2.2.1 土壤污染评价标准和方法

参照 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对麻竹笋产地土壤中重金属进行环境质量评价。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 2。计算公式分别为(1)和(2)。

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

式(1)中: P_i 为土壤中重金属 i 污染指数, $P_i \leq 1$,表示土壤未受污染; $P_i > 1$ 表示已受污染,值越大污染越严重; C_i 为土壤重金属 i 的含量; S_i 为土壤中重金属 i 的风险筛选值;

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

式(2)中: $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_{max} 为土壤中重金属污染单项指数最大值; P_{ave} 为土壤中重金属各污染指数的平均值。计算结果按污染等级进行划分^[15],见表 2。

表 2 土壤污染分级标准

Table 2 Classification standard of soil pollution

等级	综合污染指数	污染等级	污染水平
I	$P \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	污染物超出标准
IV	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	中度污染
V	$P > 3.0$	重度污染	严重污染

1.2.2.2 富集系数

利用 BCF 分析麻竹笋吸收重金属的能力。BCF 常用于评价植物对土壤中某种重金属元素的吸收富集能力^[16],由麻竹笋中重金属浓度与相应产地土壤中重金属浓度的比值表示。富集系数根据方程(3)表示:

$$BCF = \frac{C_R}{C_S} \quad (3)$$

式(3)中: BCF 为富集系数,富集系数越大,表明植物吸收转运重金属的能力越强;反之,则表明吸收能力较弱; C_R 为麻竹笋中某种重金属元素的浓度,mg/kg; C_S 为麻竹笋产地土壤中该重金属元素的浓度,mg/kg。

1.3 统计学分析

采用 Excel 对数据进行统计,用 SPSS 26.0 分析软件对重金属元素的污染指数、麻竹笋中重金属含量及其产地土壤中重金属含量的相关性和富集系数进行分析, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 方法准确度和精密度

为验证所采用方法的准确性,选取国家标准物质花粉(GBW10026)和土壤(GBW07453)作为质控样品,按照麻竹笋和麻竹笋产地土壤样品同样的预处理过程和检测方法,对质控样进行 3 次平行样测定并取其平均值,结果如表 3 所示。由表 3 可知,花粉(GBW10026)和土壤(GBW07453)中测定的 As、Hg、Cd、Mn、Ba、Ni、Cu、Cr、Pb 和 Ti 等元素含量的测定值均在标准认定证书的认定范围内,表明本实验采用的方法在麻竹笋及其产地土壤中重金属的测定中具有较高的准确性。同时,各元素 3 次平行测定的相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD)均 $< 10\%$,表明了该方法具有良好的精密度。

表3 国家标准物质GBW10026(花粉)测定结果
Table 3 Determination of national standard substance

GBW 10026 (pollen)			
元素	标准值/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	RSD/%
As	0.095±0.020	0.086	6.1
Hg	0.003 2±0.001 3	0.002 3	3.7
Cd	0.037±0.003	0.036	4.3
Mn	22.7±0.6	22.66	3.3
Ba	2.9±0.5	2.5	5.0
Ni	0.5±0.1	0.5	3.6
Cu	8.2±0.8	7.9	5.2
Cr	0.51±0.009	0.49	4.1
Pb	0.25±0.04	0.22	3.8
Ti	20±4	17	5.3

2.2 麻竹笋样品中的重金属含量特征

广西主产区麻竹笋中重金属含量的特征见表4。麻竹笋中重金属元素的含量从高到低依次为 Mn>Cu>Ba>Ti>Ni>Cr>Pb>Cd>As>Hg。按照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中的限量要求 (Pb≤0.1 mg/kg, Hg≤0.01 mg/kg, As≤0.5 mg/kg, Cd≤0.05 mg/kg, Cr≤0.5 mg/kg) 进行判定, 115 份麻竹笋样品中所有重金属含量均未超出限量值。主产区麻竹笋中 Ni 和 Cu 的平均含量与中国东南地区竹笋的平均值相近^[17], 反映了区域间重金属含量的相似性。图1则直观呈现了广西四个主产区麻竹笋中重金属含量的分布情况。

变异系数是衡量数据以均数为基准的离散程度、变化趋势以及数据分布稳定性和有效性的重要指标^[18-19], 当变异系数大于100%时, 表明数据具有强变异性。由表4可知, As 和 Cu 元素的变异系数均>100%, 说明这两种元素在空间分布上存在差异显著, 其含量可能受外部因素干扰较大。其余元素的变异系数为10%~100%, 属于中等变异, 表明这些元素的含量虽受人类活动及其他因素的影响, 但仍呈现一定的空间聚集规律。

表4 广西主产区麻竹笋重金属含量值特征表

Table 4 Characteristic table of heavy metal content values of bamboo shoots in the main producing areas of Guangxi

重金属元素	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	均值/(mg/kg)	标准偏差/(mg/kg)	变异系数/%	标准限值/(mg/kg)	超标率/%
Cd	0.037 6	0.001 03	0.004 76	0.007 09	0.006 26	88.4	0.05	0
Hg	0.005 86	0.001 03	0.003 08	0.003 00	0.000 82	27.4	0.01	0
As	0.037 2	0.002 00	0.002 00	0.003 17	0.004 74	149.5	0.5	0
Pb	0.094 4	0.020 0	0.020 0	0.029 5	0.018 2	61.6	0.1	0
Cr	0.306	0.050 0	0.050 0	0.062 2	0.037 4	60.1	0.5	0
Cu	15.6	0.462	0.953	1.19	1.44	121.5	—	—
Ni	1.32	0.200	0.200	0.225	0.118	52.4	—	—
Ti	0.677	0.020 0	0.238	0.244	0.130	53.4	—	—
Mn	27.1	0.591	3.02	3.95	3.77	95.2	—	—
Ba	3.36	0.047 6	0.434	0.658	0.626	95.1	—	—

注:—表示数据不存在, 即 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的范围中无 Cu、Ni、Mn 和 Ba 元素的限量指标

以上结果表明, 大部分地区土壤质量良好, 但存在部分地区 Cd、As、Cr 和 Ni 超出风险筛选值的现象。已有研究表明, 广西主要以喀斯特地貌为

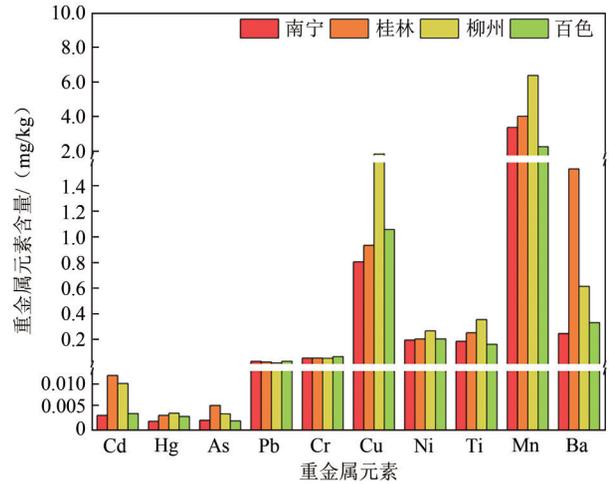


图1 广西主产区麻竹笋重金属含量特征

Figure 1 Characteristics of heavy metal content in bamboo shoots in the main production areas of Guangxi

2.3 麻竹笋产地土壤中的重金属含量特征

表5为广西4个主产区麻竹笋产地土壤重金属含量特征表, 图2为广西4个主产区麻竹笋产地重金属含量特征图, 图3为4个主产区土壤样品具体各个元素的含量及在土壤不同pH的筛选值中的超标数据。根据表5的数据显示, 麻竹笋产地土壤中重金属元素的含量从高到低依次为 Ti>Ba>Mn>Cr>Cu>Pb>Ni>As>Cd>Hg。按照 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中的风险筛选值要求进行判定, 115 份麻竹笋产地土壤样品中, Cd 元素有 16.5% 超出风险筛选值, As 元素有 3.5% 超出风险筛选值, Cr 元素有 0.9% 超出风险筛选值, Ni 元素有 1.7% 超出风险筛选值, 而 Hg、Pb、Cu 均未超出风险筛选值。由图3可知, Cd 元素风险值超标率达 16.5% 主要归因于桂林样品在 pH 范围为 5.2~6.7 的 Cd 元素含量较高, 这与其本底背景值较高有关。

主, 石灰岩母质在自然风化和土壤形成过程中重金属会凝结, 土壤高度富集 Cd、As 和 Cr 等元素^[20], 这与本研究的元素超风险筛选值的结果一致。这可

表5 广西主产区麻竹笋产地土壤重金属含量值特征
Table 5 Characteristics of heavy metal content values in soil of bamboo shoot production sites in the main production areas of Guangxi

重金属元素	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	均值/(mg/kg)	标准偏差/(mg/kg)	变异系数/%	风险筛选值	超标率/%
pH	7.81	4.23	5.34	5.44	0.781	14.4	pH≤5.5 5.5<pH≤6.5 6.5<pH≤7.5 pH>7.5	—
Cd	1.57	0.025 8	0.0940	0.177	0.199	112	0.3 0.3 0.3	0.6 16.5
Hg	0.491	0.043 9	0.112	0.132	0.076 7	57.9	1.3 1.8 2.4	3.4 0
As	103	1.45	8.58	12.1	12.4	103	40 40	25 3.5
Pb	62.1	5.25	18.6	20.1	9.94	49.5	70 90	170 0
Cr	191	10.2	54.6	58.2	24.5	42.1	150 150	250 0.9
Cu	128	3.95	18.8	23.4	19.2	81.9	150 150	200 0
Ni	75.4	2.00	17.1	19.9	12.2	61.4	60 70	190 1.7
Ti	14 328	703	1 711	2 078	1 546	74.4	—	—
Mn	3 423	29.3	220	337	416	123.7	—	—
Ba	3 446	12.7	138	371	676	182.4	—	—

注：—表示数据不存在，即GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》中风险筛选值项目未包括Ti、Mn和Ba元素，无法用该标准进行风险筛选值的判定

能与自然岩溶地质背景和特殊的成土过程有关，也可能受到种植区靠近生活区排放的污染物、汽车尾气、施肥不当等人为因素的影响。

As、Hg、Cd、Cu、Ni、Ti、Mn、Ba 变异系数均>50%，表明这些元素在不同地区的含量存在显著差异。这种变异性可能源于不同地区的土壤背景值差异以及外源污染物的输入，如施肥、灌溉等人为活动的影响。其中，Cd 和 Ba 的变异系数分别为 112% 和 182.4%，属于强变异性。结合图 2 可以看出，桂林主产区的 Cd 和 Ba 元素含量显著高于其他 3 个主产区，表明这种强变异性可能是由于单个主产区（如桂林）的含量偏高所致。这一现象进一步凸显了区域间土壤重金属分布的异质性及其潜在的环境影响因素。

2.4 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对土壤重金属污染情况展开评价，结果见图 4。对所选取 4 个麻竹笋主产区共计 115 份麻竹笋产地土壤样品进行分析后发现，4 个麻竹笋主产区土壤中重金属污染程度由高到低依次表现为：南宁市为 Cr>Cd>Pb>As>Ni>Hg>Cu；桂林市为 Cd>As>Cr>Pb>Ni>Cu>Hg；柳州市为 As>Cd>Cr>Ni>Pb>Cu>Hg；百色市为 Cr=Ni>As>Cu>Pb>Hg>Cd。所有麻竹笋产地土壤样品的单污染指数 P_i 均<1，表明这些区域的土壤未见明显的重金属污染，土壤环境整体处于较为良好的状态。

内梅罗综合污染指数的分析结果显示，麻竹笋主产区南宁市、柳州市及百色田林县各采样点的土壤综合污染指数均<0.7，按照土壤污染分级标准，这些采样区域的土壤环境质量属于清洁水平；而桂林市永福县麻竹笋主产区采样点土壤的综合污染指数为 0.75，按照土壤污染程度划分，该区域土壤属于尚清洁水平，处于位于警戒线内。综合单项污染指数和内梅罗综合污染指数的结果来看，广西 4 个麻竹笋主产区的土壤环境质量整体处于安全水平，能够为麻竹笋的安全生产提供良好的土壤条件。

2.5 富集系数分析

根据主产区麻竹笋中 Hg、As、Cd 等 10 种重金属含量的平均值与对应的土壤金属元素含量的比值，计算得出麻竹笋对重金属的 BCF。如图 5 所示，南宁市麻竹笋中重金属富集系数依次为 Cu>Cd>Mn>Hg>Ni>Ba>Pb>Cr>As>Ti；桂林市麻竹笋中重金属富集系数依次为 Cd>Cu>Hg>Ni>Mn>Ba>Cr>Pb>As>Ti；柳州市麻竹笋中重金属富集系数依次为 Cu>Cd>Hg>Mn>Ni>Ba>Pb>Cr>As=Ti；百色市麻竹笋中

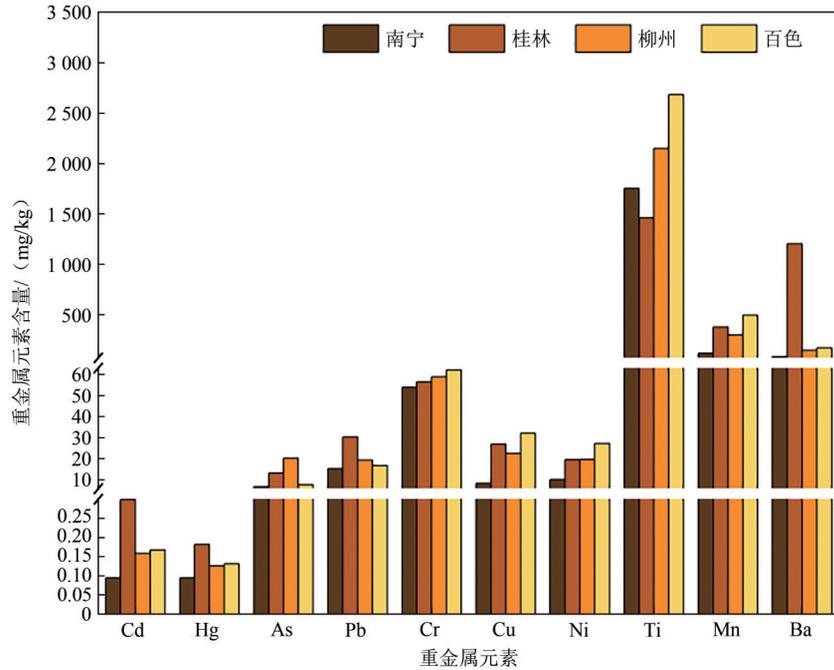


图2 广西主产区麻竹笋产地土壤重金属含量特征

Figure 2 Characteristics of heavy metal content in soil of bamboo shoot production areas in the main production areas of Guangxi

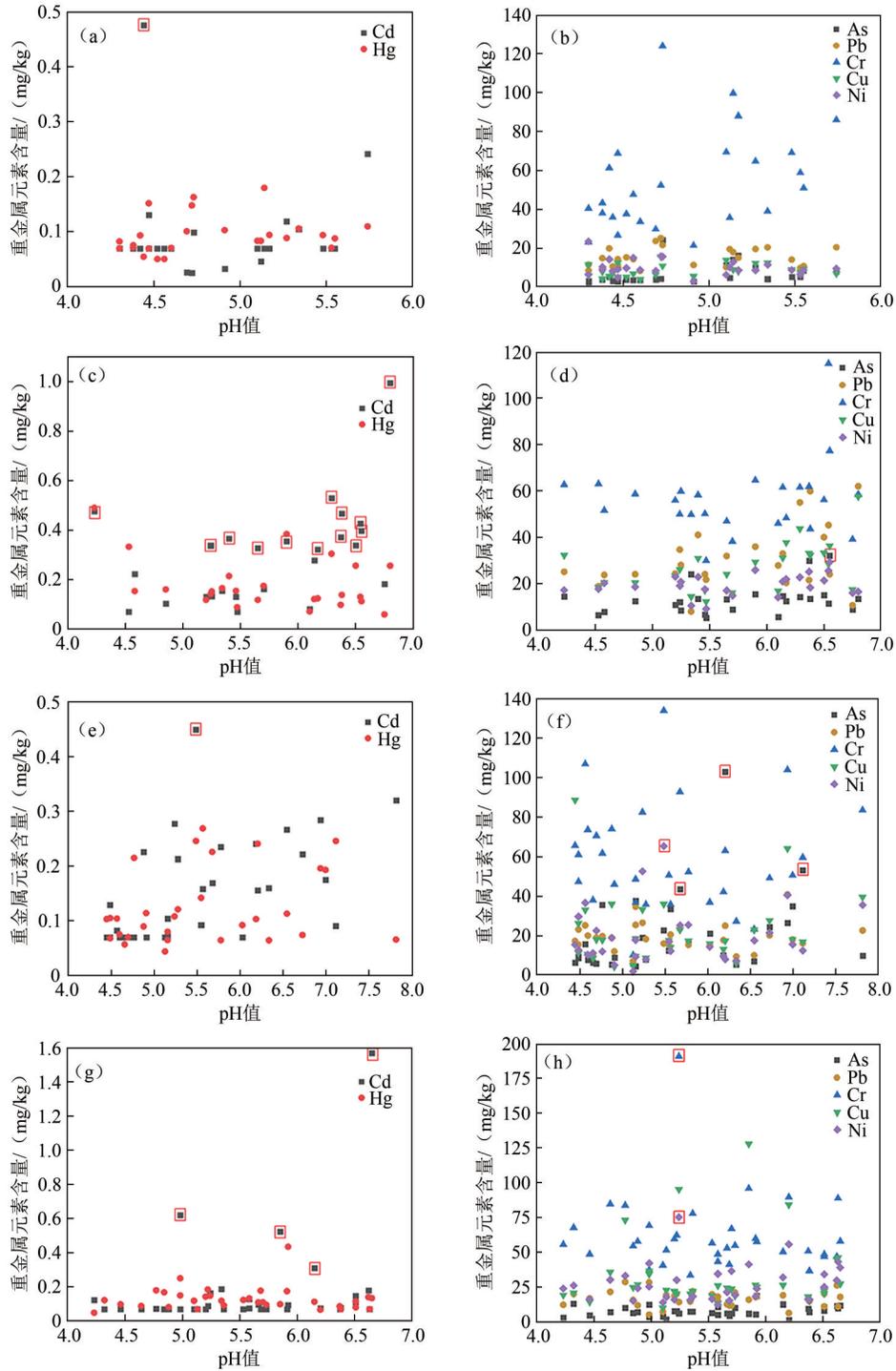
重金属富集系数依次为 $Cu > Hg > Cd > Ni > Mn > Pb > Ba > Cr > As > Ti$ 。4个主产区麻竹笋中重金属富集系数存在明显差异,其中Cu和Cd的富集系数较高,表明麻竹笋对这两种元素的吸收能力较强;而Cr、Pb、Bb、As和Ti的富集系数 < 0.005 ,说明麻竹笋对这5种金属元素的吸收能力很低。这与李怡欣等的研究结果基本一致^[21-22],因为Cr、Pb元素属于生物有效性低的元素,大多以难溶物的形态存在土壤中,难以被植物吸收或迁移。Cu属于生物有效性高的元素,麻竹笋对Cu的BFC高于其他元素但低于广东地区麻竹笋对Cu的BCF 0.22~0.37^[21],可能与广西喀斯特地貌特有的高钙镁土壤环境降低了重金属生物有效性有关。此外,图5显示,麻竹笋对Ni、Mn和Cu富集系数与产地土壤这三种元素的含量(如2.3所述)呈现相反趋势,即随着土壤中Ni、Mn和Cu含量的增加,麻竹笋对这些元素的富集系数降低。这表明,在土壤中重金属含量较高的情况下,麻竹笋倾向于减少重金属的富集;而在土壤中重金属含量较低的情况下,麻竹笋则表现出更高的富集效率。这一现象揭示了麻竹笋吸收和富集重金属的复杂性,可能与其对重金属的耐受机制及调控能力有关。

2.6 相关性分析

对广西4个主产区重点种植区域的115份麻竹笋样品及其对应土壤样品中各元素含量进行对比分析,采用Pearson相关性分析方法,探讨麻竹笋中As、Cd、Mn、Ba、Ni、Ti、Cu、Cr、Hg、Pb含量与相应

麻竹笋产地土壤中重金属含量的相关性。

由表6可知,麻竹笋中Hg含量与相应麻竹笋产地土壤As含量存在极显著正相关($P < 0.01$),与土壤中的Pb、Ba存在显著正相关($P < 0.05$);麻竹笋中As含量与相应麻竹笋产地土壤Hg含量存在极显著正相关($P < 0.01$),与土壤中的As含量存在显著正相关($P < 0.05$);麻竹笋中Cd含量与相应麻竹笋产地土壤中的Pb、Ba含量存在极显著正相关($P < 0.01$),与土壤中的Hg含量存在显著正相关($P < 0.05$);麻竹笋中Cr含量与相应产地土壤中的Mn含量存在极显著相关($P < 0.01$),与土壤中的Hg含量存在显著正相关($P < 0.05$);麻竹笋中Pb含量与相应麻竹笋产地土壤中的As含量存在极显著负相关($P < 0.01$),与土壤中的Hg、Cd、Pb存在显著负相关($P < 0.05$),在一定范围内,麻竹笋中的Pb含量随着土壤中Pb含量的增加而降低。因为Pb元素属于生物有效性低的元素,多以难溶形态存在,植物吸收率低^[23]。表明土壤中的Pb可能并非麻竹笋中Pb的主要来源,也与麻竹笋对Pb吸收率有关,尽管土壤中Pb含量较高,但植物能吸收较少。麻竹笋中Pb与土壤中As、Hg和Cd之间的这种负相关可能部分归因于植物对重金属胁迫的潜在防御机制^[24];麻竹笋中Mn含量与相应麻竹笋产地土壤中的Ni存在极显著正相关($P < 0.01$);麻竹笋中Ba含量与相应麻竹笋产地土壤中的Hg、Pb、Ba含量存在极显著正相关($P < 0.01$);麻竹笋中Ti含量与相应麻竹笋产地土壤中的As含量存在极显著正相关



注:a、b为南宁;c、d为桂林;e、f为柳州;g、h为百色

图3 四个主产区麻竹笋产地土壤重金属含量

Figure 3 Characteristics of heavy metal content in soil of bamboo shoot production areas in the main production areas

($P < 0.01$)。

土壤中重金属元素的分布及其相互作用对麻竹笋富集重金属具有重要影响,这些相关性分析结果揭示了麻竹笋及其产地土壤中重金属元素含量之间存在多种复杂相关关系。对重金属的富集不仅受土壤中同种重金属含量的影响,还与其他重金属元素的存在密切相关,还可能受到其他元素的协同或拮抗作用的影响,也可能是植物对重金属胁迫

的潜在防御机制发生作用。这一发现为进一步研究重金属在土壤-植物系统中的迁移机制及调控措施提供了科学依据,同时也为竹笋种植区的土壤管理和食品安全控制提供了科学参考。

3 讨论

广西4个主产区麻竹笋中的10种重金属元素,Mn元素含量值最大,Hg元素含量值最小。115份

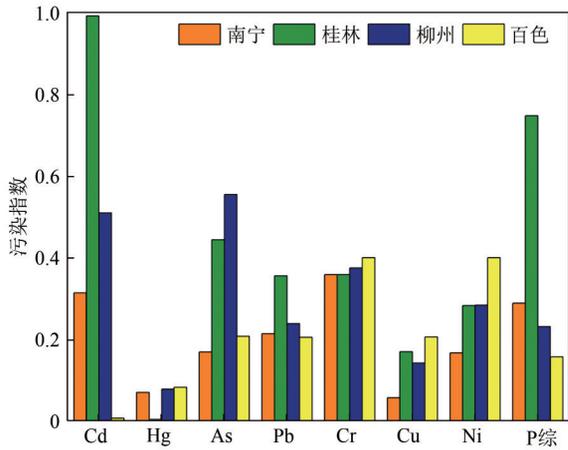


图4 广西主产区麻竹笋产地土壤不同重金属的单污染指数及综合污染指数

Figure 4 Single and combined pollution indices of different heavy metals in soils of bamboo shoot production areas in the main production areas of Guangxi

麻竹笋样品中,重金属元素含量均未超过食品安全国家标准限量值要求,符合食品安全要求。广西4个麻竹笋主产区的产地土壤中,Cd、As、Cr和Ni元素存在一定程度风险值超标情况,这可能与广西自然岩溶地质导致重金属背景值偏高有关,也可能受人为因素影响;而其他重金属元素均未超风险筛选值,土壤质量总体处于可控范围内。

BCF分析结果表明,不同主产区麻竹笋中重金属富集系数存在明显差异,麻竹笋对重金属的富集能力普遍较弱($BCF < 0.05$),仅Cu、Cd相对高于其他元素。相关性结果显示麻竹笋中部分重金属元素(如As、Ba)与土壤中相应元素的含量显著相关,土壤中的Mn、As与麻竹笋中的Mn、As存在显著正相关关系,表明土壤中这些元素的含量可能对麻竹笋中重金属的积累具有直接影响,因此需要对土壤中Mn和As的含量进行严格监控,可进一步溯源至

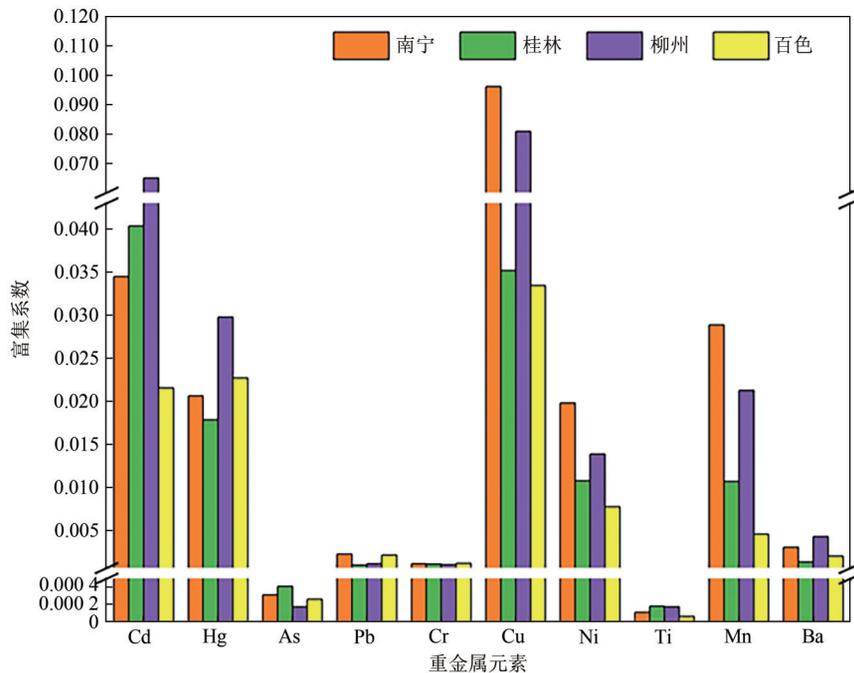


图5 麻竹笋中金属元素富集系数

Figure 5 Enrichment coefficients of metal elements in bamboo shoots

表6 麻竹笋中重金属元素与土壤中重金属元素的Pearson相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficients between heavy metal elements in bamboo shoots and heavy metal elements in soil

土壤元素	产品元素									
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Ti	Mn	Ba
Cd	0.163	0.097	0.055	-0.228*	0.108	-0.031	0.046	-0.001	-0.02	0.278**
Hg	0.230*	0.109	0.306**	-0.188*	0.206*	-0.085	-0.007	0.114	0.093	0.361**
As	0.169	0.295**	0.238*	-0.247**	-0.016	0.072	0.009	0.259**	0.066	0.153
Pb	0.353**	0.192*	0.165	-0.188*	-0.05	-0.024	-0.031	0.084	0.063	0.509**
Cr	0.061	-0.056	-0.045	-0.034	0.036	-0.108	-0.027	-0.122	0.11	0.072
Cu	0.079	0.17	-0.011	-0.05	0.078	0.038	0	0.009	0.009	0.13
Ni	0.1	0.17	-0.026	-0.018	0.135	-0.012	0.103	-0.063	0.262**	0.122
Ti	-0.051	0.008	-0.063	0.137	0.119	-0.014	0	-0.026	-0.029	-0.107
Mn	0.039	0.072	-0.072	-0.111	0.412**	0.005	0.135	0.063	0.149	0.126
Ba	0.328**	0.196*	0.08	-0.154	0.04	-0.027	-0.021	0.079	-0.049	0.677**

注:** $P < 0.01$; * $P < 0.05$

该样品来源地点,并持续监控麻竹笋样品中重金属含量的变化情况,以保障食品安全和生态环境健康。然而,其他元素(如 As、Hg 等)的相关性较弱,说明其含量可能更多地受到其他因素(如大气沉降、施肥等)的影响。这一分析结果为揭示麻竹笋中重金属的来源及其积累机制提供了重要依据,同时也为麻竹笋种植区的土壤管理和食品安全控制提供了科学参考。

本研究的不足:在探究麻竹笋及其产地土壤重金属含量及相关性过程中,选取的麻竹笋为可食用的成熟期麻竹笋,而未能覆盖麻竹笋完整的生长周期,对于麻竹笋不同生长周期对重金属的富集、迁移机理尚未清楚,且对不同形态重金属的富集还有待进一步研究。

参考文献

- [1] SINGHAL P, BAL LM, SATYA S, et al. Bamboo shoots: a novel source of nutrition and medicine [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(5): 517-534.
- [2] 于增金,殷彪,赵婷,等.不同地类对麻竹竹笋品质的影响[J].*安徽农业大学学报*, 2020, 47(1): 76-81.
YU Z J, YIN B, ZHAO T, et, al. Effect of different land types on the quality of dendrocalamus latiflorus shoots [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(1): 76-81.
- [3] ZHANG A Y, YING L J, MAMAT Z, et al. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediment of Bortala River, Northwest China [J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2016, 126: 94-101.
- [4] OTANSEV P, TASKIN H, BASSARI A, et al. Distribution and environmental impacts of heavy metals radioactivity in sediment and seawater sample of the Marmara Sea [J]. *Chemosphere*, 2016, 154: 266-275.
- [5] JIANG A G, XU N, LIU B X, et al. Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2018, 157(15): 1-8.
- [6] FEI X F, LOU Z H, XIAO R, et al. Source analysis and source-oriented risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils of different cultivated land qualities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 341: 130924.
- [7] CHENG S, Heavy metal pollution in China: origin, pattern and control [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, 10(3): 192-198.
- [8] CHAI L, WANG Y, WANG X, et al. Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107507.
- [9] XIA X, JI J, ZHANG C, et al. Carbonate bedrock control of soil Cd background in Southwestern China: its extent and influencing factors based on spatial analysis [J]. *Chemosphere*, 2022, 290: 13390.
- [10] BIAN F, ZHONG Z, ZHANG X, et al. Bamboo-An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2020, 246: 125750.
- [11] YANG Q Q, LI Z Y, LU X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 690-700.
- [12] LIU L, ZHANG X, ZHONG T. Pollution and health risk assessment of heavy metals in urban soil in China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2016, 22(2): 424-434.
- [13] BRIFFA J, SINAGRA E, BLUNDELL R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans [J]. *Heliyon*, 2020, 6(9): 5-6.
- [14] WANG Z, CHEN Y, WANG S, et al. Pollution risk assessment and sources analysis of heavy metal in soil from bamboo shoots [J]. *International Journal of Environment Research and Public Health*, 2022, 19(22): 14806.
- [15] 黄沐晨. 福建竹林土壤重金属与竹笋健康风险评估 [J]. *广西林业科学*, 2023, 52(6): 746.
HUANG M C. Assessment of heavy metals in soils and health risk of bamboo shoots in Fujian [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2023, 52(6): 746.
- [16] SONG N, ZHANG S, HONG M, et al. Impact of dissolved organic matter on bioavailability of chlorotoluron to wheat [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(3): 906-912.
- [17] MO R, CHENG J, TANG F, et al. Heavy metals in bamboo shoots from Southeastern China and risk assessment [J]. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2021, 14(4): 264-270.
- [18] 徐勇, 张晓团, 杨志东, 等. 某钒尾矿库周边土壤重金属污染评价 [J]. *有色金属(矿山部分)*, 2021, 73(6): 125-129.
XU Y, ZHANG X T, YANG Z D, et, al. Evaluation of heavy metal pollution in soils near a vanadium tailings pond [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2021, 73(6): 125-129.
- [19] 王莎, 马俊杰, 赵丹, 等. 陕北地区土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(5): 44-47.
WANG S, MA J J, ZHAO D, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of soil metals in north area of Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(5): 44-47.
- [20] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 [J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 449-459.
MA H H, PENG M, LIU F, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. *Environment Science*, 2020, 41(1): 449-459.
- [21] 李怡欣, 谢桂军, 李腊梅, 等. 广东麻竹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 soil in Guangdong province [J]. *Forestry and Environmental*

Science, 2020, 36(6): 103-109.

[22] 胡宏祥, 邹长明. 环境土壤学[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2013: 196.

HU H X, ZOU C M. Environmental Soil Science [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2013: 196.

[23] 姜培坤, 徐秋芳, 罗熙钦, 等. 雷竹笋重金属含量及其与施肥的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2004, 21(4): 66-69.

JIANG P K, XU Q F, LUO X Q, et al. Changes in heavy metal amount of bamboo shoots of *Phyllostachys praecox* responsive to nitrogen rate[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2004, 21(4): 66-69.

[24] XIONG C, ZHANG Y, XU X, et al. Lotus roots accumulate heavy metals independently from soil in main production regions of China[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 295-302.

《中国食品卫生杂志》顾问及第五届编委会名单

顾问: 陈君石、黄璐琦、江桂斌、李林、沈建忠、吴清平、Jianghong Meng(美国)、Patrick Wall(爱尔兰)、Samuel Godefroy(加拿大)、Gerald Moy(美国)、Paul Brent(澳大利亚)、Marta Hugas(比利时)、Yukikko Yamada(日本)、Tom Heilandt(德国)、Andreas Hensel(德国)、Christopher Elliott(英国)、Christine Nelleman(丹麦)

主任委员: 李宁

副主任委员: 王竹天、孙长颢、王涛、谢剑炜、应浩、丁钢强、张峰、张永慧

主编: 吴永宁

编委(按姓氏笔画排序)

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 丁钢强(中国疾病预防控制中心营养与健康所) | 应浩(中国科学院上海营养与健康所) |
| 于洲(国家食品安全风险评估中心) | 张丁(河南省疾病预防控制中心) |
| 于维森(青岛市疾病预防控制中心) | 张峰(中国检验检疫科学研究院) |
| 马宁(国家食品安全风险评估中心) | 张卫兵(南通市疾病预防控制中心) |
| 马会来(中国疾病预防控制中心) | 张立实(四川大学华西公共卫生学院) |
| 马群飞(福建省疾病预防控制中心) | 张永慧(广东省疾病预防控制中心) |
| 王君(国家食品安全风险评估中心) | 张旭东(国家卫生健康委员会医院管理研究所) |
| 王茵(浙江省医学科学院) | 张剑峰(黑龙江省疾病预防控制中心) |
| 王涛(浙江清华长三角研究院) | 张朝晖(中国海关科学技术研究中心) |
| 王硕(南开大学医学院) | 张惠媛(中国海关科学技术研究中心) |
| 王慧(上海交通大学公共卫生学院) | 张遵真(四川大学华西公共卫生学院) |
| 王永芳(国家卫生健康委员会卫生健康监督中心) | 陈波(湖南师范大学化学化工学院) |
| 王竹天(国家食品安全风险评估中心) | 陈颖(中国检验检疫科学研究院) |
| 王松雪(国家粮食和物资储备局科学研究院) | 陈卫东(广东省市场监督管理局) |
| 王晓英(中国动物疫病预防控制中心) | 邵兵(北京市疾病预防控制中心) |
| 计融(国家食品安全风险评估中心) | 武爱波(中国科学院上海营养与健康所) |
| 邓小玲(广东省疾病预防控制中心) | 赵舰(重庆市疾病预防控制中心) |
| 卢江(国家食品安全风险评估中心) | 赵云峰(国家食品安全风险评估中心) |
| 匡华(江南大学食品学院) | 赵贵明(中国检验检疫科学研究院) |
| 朱心强(浙江大学医学院) | 钟凯(科信食品与营养信息交流中心) |
| 刘弘(上海市疾病预防控制中心) | 姜毓君(东北农业大学食品学院) |
| 刘长青(河北省疾病预防控制中心) | 聂俊雄(常德市疾病预防控制中心) |
| 刘成伟(江西省疾病预防控制中心) | 贾旭东(国家食品安全风险评估中心) |
| 刘兆平(国家食品安全风险评估中心) | 徐娇(国家食品安全风险评估中心) |
| 刘守钦(济南市疾病预防控制中心) | 徐海滨(国家食品安全风险评估中心) |

(下转第628页)