

# 云南省水生蔬菜中 5 种典型重金属含量特征及健康风险评估

张 萌<sup>1</sup>, 张银峰<sup>1\*</sup>, 赵晓慧<sup>2\*</sup>, 许 燕<sup>2</sup>, 孙 蕾<sup>1</sup>

(1. 西南林业大学湿地学院, 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224; 2. 云南省疾病预防控制中心, 昆明 650022)

**摘要: 目的** 分析云南 16 个不同地区 157 份水生蔬菜中分布广、毒性强的重金属元素(镉、铅、铬、汞、砷)含量特征, 并对其进行健康风险评估。**方法** 样品经微波消解处理后, 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)检测水生蔬菜中镉、铅、铬、汞、砷 5 种重金属元素的含量。采用重金属目标风险系数(target hazard coefficient, THQ)法对水生蔬菜中典型重金属可能产生的健康风险进行定量评估。**结果** 云南各地区水生蔬菜中 5 种重金属均有不同程度检出, 镉、铅、铬、汞、砷平均值分别为(0.006±0.019)、(0.029±0.043)、(0.036±0.075)、(0.002±0.002)、(0.108±0.164) mg/kg, 本研究采集 157 份样品中共 6 份超标样品, 整体合格率为 96.2%, 健康风险评估结果表明, 云南省水生蔬菜中重金属污染水平总体处于安全水平, 但芦蒿中镉的污染水平较高。**结论** 云南省不同种类水生蔬菜中重金属含量总体水平较低, 大部分种类水生蔬菜重金属健康安全风险较低。但是, 芦蒿和慈姑两类蔬菜有着较高的健康风险。不同人群方面, 儿童受到的健康风险相比成年人更高。

**关键词:** 水生蔬菜; 重金属; 污染; 健康风险评估

## Content characteristics and health risk assessment of 5 kinds of typical heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan Province

ZHANG Meng<sup>1</sup>, ZHANG Yin-Feng<sup>1\*</sup>, ZHAO Xiao-Hui<sup>2\*</sup>, XU Yan<sup>2</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>

(1. National Plateau Wetland Research Center, College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Center for Disease Control and Prevention, Kunming 650022, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate content characteristics of widely distributed and highly toxic heavy metals (cadmium, lead, chromium, mercury, arsenic) in 157 aquatic vegetables from 16 different areas of Yunnan Province, and evaluate their health risks. **Method** Samples were digested by microwave, and measured for the content of 5 kinds of heavy metals including cadmium, lead chromium mercury and arsenic in aquatic vegetables by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The target hazard coefficient (THQ) method was used to quantitatively assess the possible health risks of typical heavy metals in aquatic vegetables. **Result** Five kinds of heavy metals were detected in different

基金项目: 云南省科学技术厅青年基金项目(2019FD077)

Fund: Supported by the Youth Foundation of Yunnan Provincial Department of Science and Technology (2019FD077)

\*通信作者: 张银峰, 博士, 讲师, 主要研究方向为有毒有害元素的地球化学循环与去除。E-mail: zhangyinfeng11@mails.ucas.ac.cn

赵晓慧, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品理化检验、食品安全。E-mail: zhaoxhyncdc@126.com

\*Corresponding author: ZHANG Yin-Feng, Ph.D, Lecturer, National Plateau Wetland Research Center, College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China. E-mail: zhangyinfeng11@mails.ucas.ac.cn

ZHAO Xiao-Hui, Master, Technician, Yunnan Center for Disease Control and Prevention, Kunming 650022, China. E-mail: zhaoxhyncdc@126.com

degrees in aquatic vegetables in different regions of Yunnan. The average values of cadmium, lead, chromium, mercury and arsenic were  $(0.006\pm 0.019)$ ,  $(0.029\pm 0.043)$ ,  $(0.036\pm 0.075)$ ,  $(0.002\pm 0.002)$ ,  $(0.108\pm 0.164)$  mg/kg, respectively. Among 157 samples collected in this study, 6 samples exceeded the standard, and the overall qualified rate was 96.2%. The health risk assessment results showed that the level of heavy metal pollution in aquatic vegetables in Yunnan province was generally at a safe level, but the pollution level of cadmium in *Artemisia selengensis* was relatively high. **Conclusion** The overall levels of heavy metals in different types of aquatic vegetables in Yunnan Province are low, and the health risks of heavy metals in most types of aquatic vegetables are low. However, two types of vegetables, *Artemisia selengensis* and Cigu, have higher health risks. In terms of different population groups, children are exposed to higher health risks than adults.

**KEY WORDS:** aquatic vegetables; heavy metals; pollution; health risk assessment

## 0 引 言

水生蔬菜主要是指生长在淡水中、产品器官可作为蔬菜食用的维管束类植物<sup>[1-2]</sup>。水生蔬菜自古以来就是我国农业种植结构的重要组成部分,属于区域性种植,全球性消费的蔬菜,被称为“中国特菜”<sup>[2-3]</sup>。云南丰富的气候资源为水生蔬菜种植提供了良好的生态环境<sup>[4]</sup>。但云南省由于地处三大板块结合地带,频繁的板块活动和健全的沉积构造提供了良好的成矿条件,云南省各地州拥有种类不一的丰富矿产资源,这使得云南多地的自然环境中广泛分布着不同种类的重金属元素<sup>[5-6]</sup>。由于水生蔬菜具有发达的维管束组织,因此相比陆生蔬菜更易受重金属污染<sup>[7-10]</sup>,且水生蔬菜对水体常见重金属富集能力强于土壤,水生蔬菜生长周期越长,对重金属积累量更大<sup>[11]</sup>,如水芹对重金属表现出较强富集能力,且具有一定的耐受性<sup>[12]</sup>;水蕹菜和豆瓣菜在高浓度的镉、铅胁迫下,耐受性较强<sup>[13]</sup>。但是目前对云南省水生蔬菜中重金属含量特征及健康风险评估均缺乏系统的研究,故有必要对云南水生蔬菜中常见重金属的污染水平进行监测,并对其健康风险进行评估<sup>[14-16]</sup>。

食品中重金属污染是世界卫生组织(World Health Organization, WHO)重点关注的食品安全问题之一,重金属污染常常以极低的浓度造成人体极大的危害<sup>[17-18]</sup>。有学者研究表明,镉通常在人体中长期潜伏,积累一定量后易引发高血压、脑出血等常见病症<sup>[19]</sup>,为此国际原子能机构将镉定位 1A 类致癌物<sup>[20]</sup>。除此之外,典型的重金属砷、铬、汞、铅等均能够通过食物进入人体并对人体造成不同程度的损害<sup>[21-26]</sup>。因此,通过科学的评估方法对重金属可能造成的健康风险进行定量评估显得尤为重要。目前,对于重金属的污染情况常采用单因子指数法进行评估,但是该方法会忽略多种重金属间的综合作用,相比之下,内梅罗指数法则在此基础上考虑多种重金属间的综合作用<sup>[27-29]</sup>。在人体健康风险评估方面,常见的方法有食品安全指数法<sup>[30]</sup>、暴露限值法<sup>[29]</sup>、目标风险系数法(target hazard coefficient, THQ)<sup>[14,31]</sup>等。其中,THQ 和综合目标风险系数(total target hazard coefficient, TTHQ)是目前运用较广的健康风险评估方法<sup>[14,32-33]</sup>。该方法能够分别计算单个重金属

对人体健康造成的风险,同时也能够综合评估多种重金属的协同作用,故本研究采用 TTHQ 法对水生蔬菜中重金属的健康风险进行评估。

综上,本研究采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)分析检测来自云南 16 个不同地区 157 份水生蔬菜样品中广泛分布且毒性较强的 5 种典型重金属元素(镉、铅、铬、总汞、总砷)含量水平探讨分布特征,并对其进行健康风险评估,为云南省水生蔬菜中有害元素的防治及科学合理地指导居民膳食提供一定的理论基础,为日后的水生蔬菜有害元素监测工作提供有利依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 样品采集

本研究所采样品涵盖了云南省内较为常见的几种水生蔬菜类型,所有样品均来自流通环节农贸市场,分别在云南昆明、保山、楚雄、大理、德宏、迪庆、红河、丽江、临沧、怒江、普洱、曲靖、文山、西双版纳、玉溪、昭通 16 个州市共采集 157 份样品,每份样品采集 1 kg。其中慈姑采集 31 份、茭白采集 48 份、菱角采集 5 份、芦蒿采集 5 份、莲藕采集 54 份、蒲菜采集 3 份、水芹菜采集 8 份,芡实、莼菜各采集 3 份,其中莲藕、慈姑、茭白是云南市场消费量最大的水生蔬菜品种。

#### 1.1.2 试剂及仪器

多元素混合标准溶液(100  $\mu\text{g/mL}$ : Al、Sb、As、B、Ba、Be、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Mo、Na、Ni、Pb、Ag、Se、Ti、Tl、V、Zn, 美国 o2si 公司);多元素混合内标溶液(10 mg/L: <sup>6</sup>Li、Sc、Ge、Y、In、Tb、Bi, 美国 SPEX CertiPrep 公司);硝酸(痕量金属级, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

X Series 2 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); ETHOS ONE 微波消解仪(意大利 MILESTONE 公司); SI-234 万分之一电子天平(美国 DENVER 公司); B-400 均质机(瑞士 BUCHI 公司); Milli-Q reference 超纯水机(美国 Millipore 公司); VB24 电热赶酸仪(中国 Lab Tech 公司)。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 检测方法

依据 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》对样品中常见重金属镉、铅、铬、汞、砷进行分析检测。

### 1.2.2 样品前处理

取样品可食用部分洗净沥干,待测样品用均质机匀浆制样,待测。准确称取 0.25 g(精确到 0.001 g)待测样品置于聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL 硝酸,浸泡 1 h 后放入微波消解仪中,设定微波消解程序为:(1)升温时间 5 min,温度 120°C,保持时间 5 min;(2)升温时间 5 min,温度 150°C,保持时间 5 min;(3)升温时间 10 min,温度 190°C,保持时间 20 min。消解结束后,将消解罐置于电热赶酸仪上 110°C 赶酸 1 h。待冷却,定容消解液,待测定。

### 1.2.3 质量控制方法

本研究均采用标准曲线法进行定量分析,使用平行样测定、有证标物验证等质控方法,保证水生蔬菜中重金属含量检测数据的准确性。

### 1.2.4 评价标准和方法

水生蔬菜中重金属含量的评价标准参照 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》,镉(Cd)限量值为 0.05 mg/kg、铅(Pb)限量值为 0.1 mg/kg、铬(Cr)限量值为 0.5 mg/kg、汞(Hg)限量值为 0.01 mg/kg、砷(As)限量值为 0.5 mg/kg。

## 1.3 污染评价方法

### 1.3.1 样品中重金属污染评价方法

本研究采用单因子污染指数评价和内梅罗综合因子污染指数评价两种方法对水生蔬菜中重金属污染情况进行评价<sup>[29]</sup>。分别按照公式(1)、(2)进行计算:

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

式中:  $P_i$  为重金属  $i$  的单因子污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测含量值, mg/kg;  $S_i$  为金属  $i$  的标准限量值, mg/kg。

$P_i$  越大,表明受重金属  $i$  的污染程度越严重。

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

式中:  $P_{\text{max}}$  为水生蔬菜单因子污染指数的最大值;  $P_{\text{ave}}$  为水生蔬菜单因子污染指数的平均值。

判定标准如表 1 所示。

表 1 单因子污染指数和内梅罗综合因子污染指数分级  
Table 1 Classification of single-factor pollution index and Nemerow comprehensive-factor pollution index

等级	污染指数范围	污染等级	污染水平
I	$P \leq 0.7$	安全	优良
II	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	蔬菜开始受到污染
IV	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	蔬菜受中度污染
V	$P > 3.0$	重度污染	蔬菜受污染严重

### 1.3.2 重金属接触人体健康风险评价方法

本研究采用 THQ 法评估重金属对人体健康的风险<sup>[14]</sup>。该方法主要通过评估人体摄入食物中重金属剂量是否超出相应参考剂量来判断人体的暴露风险。云南省最新预期寿命为 75.1 岁,假设居民持续暴露时间平均约为 75 年。将居民分为儿童(3~12 岁)和成人(18~45 岁)两类人群,分别按照公式(3)、(4)计算 THQ 与 TTHQ:

$$\text{THQ} = (E_f \times E_d \times \text{Fir} \times C_i) / (\text{Rfd} \times W_{\text{ab}} \times T_a) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$\text{TTHQ}_i = \sum_{i=1}^5 \text{THQ} \quad (4)$$

式中:  $E_f$  为暴露频率,按 365 d/年,  $d$ ;  $E_d$  为暴露区间, 75;  $\text{Fir}$  为人均食物摄入量,儿童 223.4 g/d,成人 360.7 g/d<sup>[14]</sup>;  $C_i$  为食物的重金属含量,采用本次测得均值, mg/kg;  $\text{Rfd}$  为参比剂量, Cd 为 0.00083 mg/(kg·d)<sup>[14]</sup>、Pb 为 0.0035 mg/(kg·d)<sup>[14]</sup>、Cr 为 0.003 mg/(kg·d)<sup>[16]</sup>、Hg 为 0.00057 mg/(kg·d)<sup>[14]</sup>、As 为 0.003 mg/(kg·d)<sup>[14]</sup>;  $W_{\text{ab}}$  为人体平均体重,儿童 24.5 kg,成人 60.3 kg<sup>[15]</sup>;  $T_a$  为非致癌性平均暴露时间,  $T_a = E_d \times 365, d$ ;

若 THQ 或 TTHQ < 1,表明暴露人群没有明显的健康风险;若 THQ 或 TTHQ ≥ 1,表示暴露人群存在一定的健康风险。

## 1.4 数据分析

使用 SPSS 24.0 对不同种类及不同地区的水生蔬菜进行方差分析,对水生蔬菜中的不同指标进行相关性分析(correlation analysis)及主成分分析(principal component analysis, PCA),探讨水生蔬菜中重金属的分布特征及潜在关联。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种类水生蔬菜中重金属含量分析

不同种类水生蔬菜中重金属含量见表 2。不同种类水生蔬菜中镉、铅、铬、汞、砷平均含量分别为(0.006±0.019)、(0.029±0.043)、(0.036±0.075)、(0.002±0.002)、(0.108±0.164) mg/kg。在 157 份样品中,镉、铅、铬、汞、砷的检出率分别为 59.87%、77.07%、76.03%、12.10%、80.25%。根据 GB 2762—2017 中的限量标准判定,本研究所采集 157 份样品中共 6 份超标样品,整体合格率为 96.2%;其中铅超标的样品为红河地区 2 份茭白及昆明地区 1 份藕,砷超标的 2 件样品为采自版纳和曲靖的慈姑,镉超标的 1 件样品为采自楚雄的芦蒿。以上结果表明,云南省境内水生蔬菜中重金属超标率在 5% 以下,重金属含量整体处于较低水平。

对比发现,镉、铅、铬、汞、砷在不同种类水生蔬菜中的平均含量存在明显差异(图 1)。其中砷的平均含量最高,汞的平均含量最低,且重金属含量变化范围较大,芦蒿的镉含量最高,莲藕的镉含量相对较低,芦蒿中镉含量是莲藕的 17 倍,说明不同种类的水生蔬菜对同种重金属的富集能力存在较大差异。这种差异除了来源于种类性质的差异性外,还可能受到生长环境的影响。如莲藕属木兰亚纲,多在沼泽地栽培,喜温热<sup>[34]</sup>;芦蒿属菊科蒿,常生于湿润的路旁、山坡及疏林等地,喜阴<sup>[35]</sup>。

表 2 水生蔬菜中 5 种重金属含量(mg/kg)  
Table 2 Content of 5 kinds of heavy metals in aquatic vegetables (mg/kg)

种类	镉	铅	铬	汞	砷
慈姑	0.009±0.012	0.031±0.022	0.066±0.111	0.001±0.000	0.239±0.258
茭白	0.003±0.005	0.040±0.060	0.012±0.010	0.001±0.001	0.113±0.113
菱角	0.006±0.007	0.025±0.039	0.014±0.016	0.001±0.000	0.089±0.081
芦蒿	0.051±0.095	0.044±0.036	0.044±0.062	0.001±0.000	0.156±0.103
莲藕	0.003±0.002	0.014±0.035	0.040±0.085	0.002±0.002	0.005±0.004
蒲菜	0.003±0.003	0.022±0.112	0.024±0.029	0.001±0.000	0.204±0.183
水芹菜	0.007±0.013	0.042±0.022	0.030±0.036	0.002±0.002	0.102±0.089
其他	0.005±0.003	0.065±0.037	0.041±0.032	0.004±0.005	0.386±0.115

注: 数据为地区多样品的平均值±标准误, 下同。

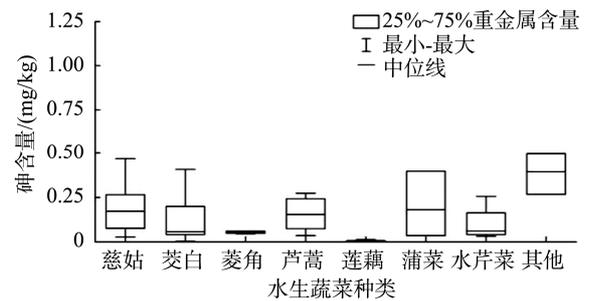
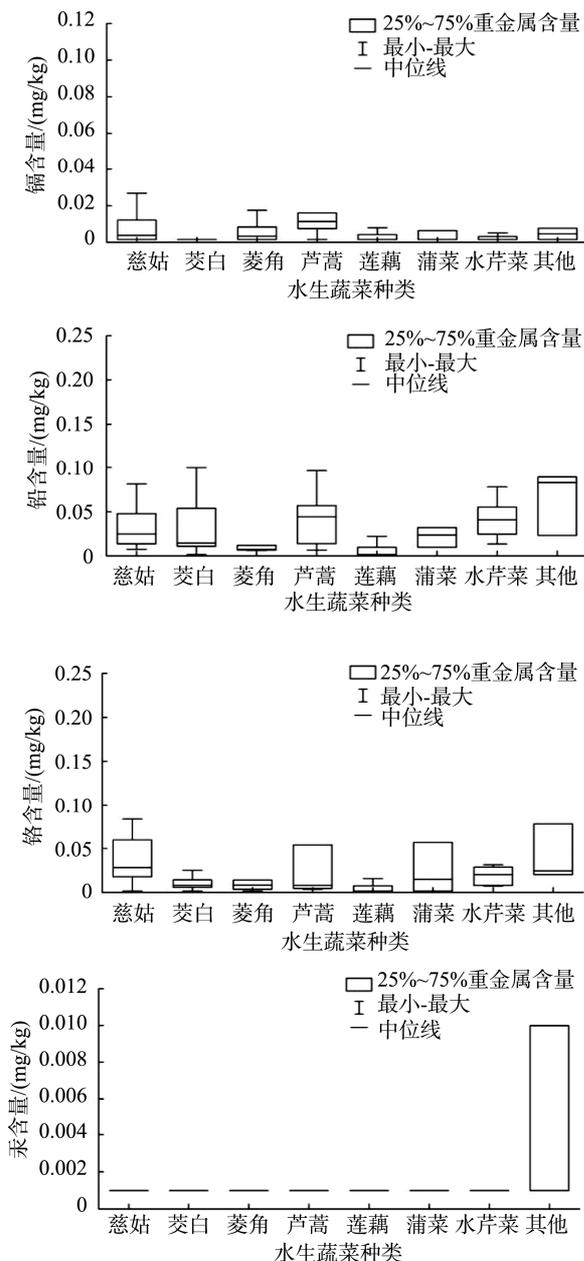


图 1 云南省不同种类水生蔬菜重金属含量  
Fig.1 Content of heavy metals in different aquatic vegetables of Yunnan Province

有研究显示, 不同水生蔬菜对同种重金属富集能力会存在一定差异, 同种水生蔬菜对不同种重金属富集也存在差异<sup>[36]</sup>。云南省不同种类水生蔬菜中镉、铅、砷含量存在显著差异( $P < 0.05$ )。对比不同指标的最高值, 发现不同重金属最高值不会出现在同一种蔬菜中, 也即同种水生蔬菜对不同重金属富集能力不同。王方园等<sup>[37]</sup>对浙中地区主要水生蔬菜的重金属含量进行调查, 结果表明不同重金属对同种水生蔬菜的污染水平不同。方妍等<sup>[38]</sup>的研究表明, 山东人工湿地水芹菜对镉的富集能力明显大于铅。而本研究结果显示, 水芹菜对镉的富集能力小于铅, 说明自然地理条件的差异也会水生蔬菜富集重金属造成影响。此外, 各种水生蔬菜的培育方式和栽培介质不同也有可能成为重金属含量差异较大的原因<sup>[2]</sup>。黄凯丰等<sup>[39]</sup>的研究表明, 不同栽培介质的茭白中铅、镉富集水平不同。通过与 GB 2762—2017 中水生蔬菜中重金属镉、铅、铬、汞、砷的限量值对比, 5 种重金属的平均含量均未超过国家限量标准。

## 2.2 不同地区水生蔬菜中重金属含量特征

地区差异会导致种植水生蔬菜的土壤和水体质量差异, 分析不同地区水生蔬菜中的重金属含量能够为各地区水生蔬菜污染防控提供一定理论支撑<sup>[40]</sup>。由表 3 可知, 德

宏、大理、楚雄地区的水生蔬菜中镉含量水平较高；大理、迪庆、红河、普洱、西双版纳和昭通地区的水生蔬菜中铅含量水平较高；保山、楚雄、迪庆、临沧和曲靖地区的水生蔬菜中铬含量水平较高；玉溪、大理、德宏地区的水生蔬菜中汞含量水平较高；大理、德宏、迪庆、普洱和西双版纳地区的水生蔬菜中砷含量水平较高，由此可见，云南不同地区水生蔬菜中的重金属含量差异较大，具有明显的地域区分(图 2)，这可能与云南全省范围内具有丰富的矿产资源有关<sup>[5]</sup>，大理地区的金属矿床高达上百个，金属矿

藏的开采活动会增加土壤中重金属含量，这可能是直接导致大理地区土壤重金属元素种类较丰富的主要原因<sup>[40-41]</sup>。另外，昆明地区水生蔬菜中的铬、汞、砷含量均最低，镉、铅含量也不高。昆明作为云南省的省会城市，凭借优越的地理位置大力发展第三产业、环保产业等，相较于地州，昆明地区的重金属污染负担相对较小<sup>[40]</sup>。综上所述，云南不同地区由于存在海拔、气候等自然条件上的差异，导致土壤环境中的重金属含量差别较大，造成各地区水生蔬菜中的重金属含量差异较大<sup>[42]</sup>。

表 3 不同地区水生蔬菜中 5 种重金属含量分析(mg/kg)  
Table 3 Analysis of 5 kinds of heavy metals in aquatic vegetables of different regions (mg/kg)

地区	镉	铅	铬	汞	砷
保山	0.003±0.003	0.031±0.028	0.098±0.197	0.002±0.002	0.043±0.037
楚雄	0.015±0.051	0.020±0.025	0.049±0.074	0.001±0.000	0.049±0.071
大理	0.011±0.145	0.056±0.037	0.032±0.039	0.003±0.003	0.219±0.162
德宏	0.010±0.011	0.032±0.022	0.023±0.013	0.003±0.002	0.202±0.099
迪庆	0.009±0.014	0.047±0.029	0.046±0.052	0.001±0.000	0.286±0.092
红河	0.002±0.000	0.080±0.120	0.008±0.006	0.001±0.001	0.039±0.030
昆明	0.005±0.005	0.020±0.054	0.003±0.003	0.001±0.000	0.022±0.022
丽江	0.003±0.001	0.028±0.030	0.020±0.014	0.002±0.002	0.077±0.078
临沧	0.002±0.001	0.016±0.010	0.092±0.183	0.001±0.000	0.111±0.084
怒江	0.007±0.011	0.015±0.004	0.015±0.008	0.001±0.000	0.082±0.065
普洱	0.003±0.001	0.064±0.013	0.030±0.015	0.001±0.000	0.379±0.073
曲靖	0.005±0.006	0.014±0.012	0.084±0.105	0.001±0.000	0.129±0.238
文山	0.003±0.002	0.009±0.008	0.011±0.019	0.001±0.000	0.038±0.049
西双版纳	0.007±0.013	0.074±0.020	0.025±0.032	0.001±0.000	0.440±0.437
玉溪	0.003±0.002	0.010±0.012	0.026±0.053	0.004±0.003	0.039±0.072
昭通	0.009±0.018	0.059±0.024	0.016±0.009	0.001±0.000	0.167±0.102

### 2.3 水生蔬菜中重金属相关性分析及主成分分析

相关性分析是推测重金属来源是否一致的重要依据。本研究对云南省水生蔬菜中 5 种毒性高且分布广泛的重金属的含量进行了相关性分析。结果表明，水生蔬菜中砷和铅两种重金属元素之间存在极显著正相关( $P<0.01$ )(表 4)，表明这两种元素具有相似的来源和地球化学迁移行为，砷元素经常与铅矿存在伴生关系，云南多地均分布有砷铅矿，这可能是导致各地水生蔬菜中砷和铅的显著相关性的主要原因。其余几种常见重金属(镉、铬、汞)之间则没有显著相关性。

主成分分析结果表明，前 3 个主成分(PC1 28.981%、PC2 20.697%、PC3 19.895%)的总方差贡献率约为 70%，且前 2 个主成分的特征值均大于 1，PC3 特征值约为 1，表明这 3 个主成分(总特征值: 3.479)几乎可以代表原始数据的绝大部分信息(表 5)。其中，PC1 对总方差的贡献率为 28.981%，其特征因子变量在砷(0.701)和铅(0.665)元素上具有较高的负载，由于云南本身矿产资源种类丰富<sup>[5]</sup>，因此，推测 PC1 代表的是与砷铅矿相关的环境因素。同时这也表明砷和铅具有相同的来源，这与相关性分析结果一致。

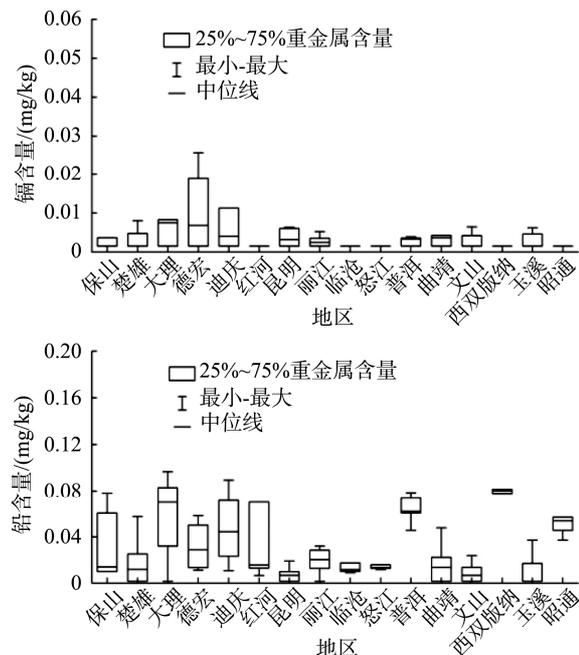


图 2 云南省不同地区水生蔬菜中重金属浓度分布情况  
Fig.2 Distributions of heavy metal contents in different regions of Yunnan Province

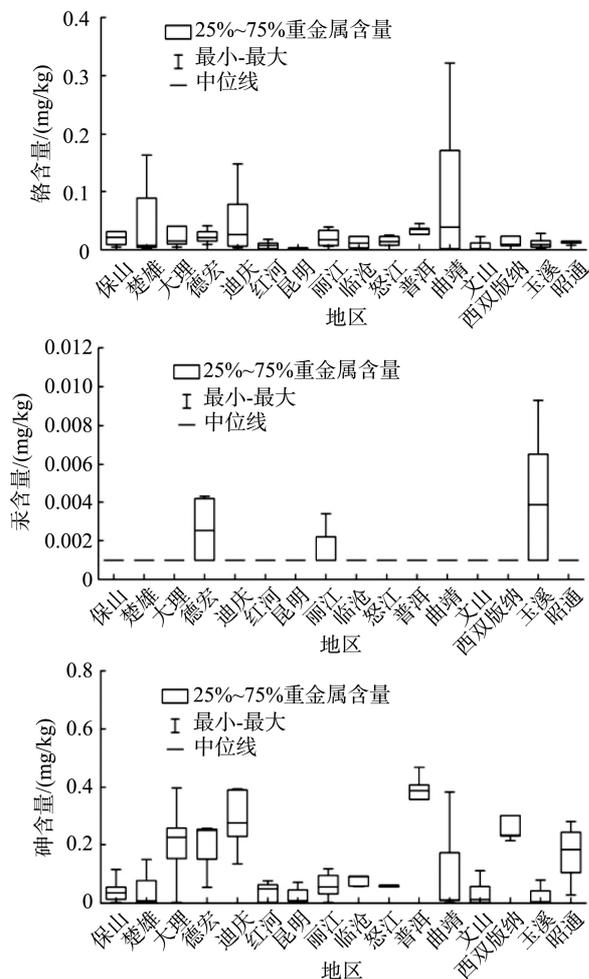


图 2(续) 云南省不同地区水生蔬菜中重金属浓度分布情况  
Fig.2 Distributions of heavy metal contents in different regions of Yunnan Province

另外, 从地区的角度看, 大理、迪庆、西双版纳及普洱地区水生蔬菜中元素分布状况受 PC1 影响最大, 这与这 4 个区域水生蔬菜较高的砷、铅含量完全一致(图 2~3)。PC2 对总方差的贡献率为 20.697%, 其特征因子变量在铬(0.688)和镉(0.498)元素上具有较高的负载, 表明 PC2 代表与铬元素密切相关的环境因素(表 5)。从地区角度看, 楚雄和曲靖水生蔬菜中元素分布受 PC2 影响最大, 这与楚雄、曲靖两地水生蔬菜中较高的铬含量相关(图 2~3)。综上所述, 通过主成分

分析可将云南多地水生蔬菜中的重金属分布特征通过与砷、铅矿相关的 PC1 和与铬相关的 PC2 进行一定程度的分类。

表 4 水生蔬菜中重金属相关性分析

**Table 4 Correlation analysis of heavy metals in aquatic vegetables**

指标	镉	铅	铬	汞	砷
镉	1				
铅	-0.003	1			
铬	0.030	-0.023	1		
汞	-0.010	0.028	0.000	1	
砷	0.110	0.227**	0.102	-0.014	1

注: \*\*表示极显著相关,  $P < 0.01$  (双尾)。

**2.4 水生蔬菜中重金属单因子和内梅罗综合因子污染评价**

由表 6 可知, 慈姑、茭白、菱角、莲藕、蒲菜、水芹菜中 5 种重金属元素的综合因子污染指数均远低于 0.7, 属于污染等级的优良水平, 无明显受污染迹象。但是, 芦蒿中镉单因子污染指数为 1.02, 各重金属的综合因子污染指数为 0.70, 表明芦蒿中的重金属污染风险已达到警戒程度, 其中镉的污染风险指数更是达到了轻度污染的程度, 需要引起关注。值得注意的是, 其他(茺菹、芡实)水生蔬菜中砷的单因子污染指数为 0.77, 已经处于污染警戒线范围, 存在一定的砷污染风险。综上所述, 云南省水生蔬菜的整体污染风险水平较低, 但其中芦蒿的综合因子污染指数较高, 说明芦蒿相较于其余种类已处于污染警戒范围, 存在潜在污染风险。另外, 部分水生蔬菜中砷的单项污染风险也较高, 值得进一步关注。

**2.5 水生蔬菜重金属健康风险评估**

不同种类水生蔬菜中重金属的 THQ 和 TTHQ 结果见表 7, 人体摄入不同种类水生蔬菜带来的健康风险具有显著差异( $P < 0.05$ )。各元素健康风险对总风险的贡献率如图 4 所示。云南省水生蔬菜的 TTHQ 风险排序为其他类>芦蒿>慈姑>蒲菜>水芹菜>茭白>菱角>莲藕。其中蒲菜、水芹菜、茭白、菱角、莲藕中 5 种重金属的 TTHQ 均小于 1, 尚无健康风险, 可安心食用。但是, 慈姑、芦蒿和其他类健康风险较大( $TTHQ > 1$ ), 慈姑和其他类中砷的贡献率最大, 分别为 65%和 74%, 芦蒿中镉的贡献率最大为 43%, 这与重

表 5 水生蔬菜中重金属主成分分析结果

**Table 5 Principal component analysis Results of heavy metals in aquatic vegetables**

成分	初始特征值			重金属	各项的负载		
	特征值	解释比例/%	累计比例/%		PC1	PC2	PC3
PC1	1.449	28.981	28.981	镉	0.210	0.498	0.042
PC2	1.035	20.697	49.678	铅	0.665	-0.294	-0.113
PC3	0.995	19.895	69.573	铬	0.140	0.688	0.477
PC4	0.966	19.326	88.898	汞	0.051	-0.438	0.869
PC5	0.555	11.102	100.00	砷	0.701	0.024	-0.063

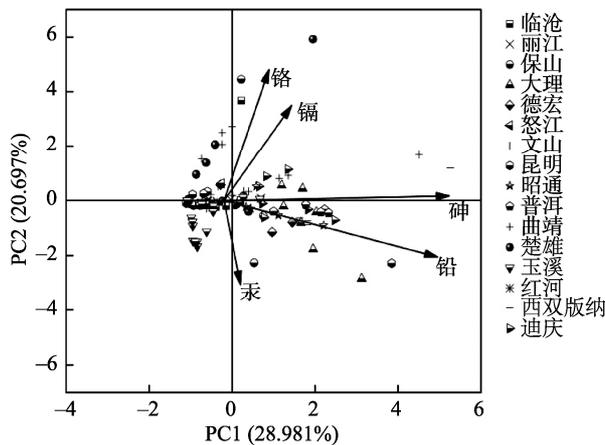


图 3 云南省水生蔬菜中重金属主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan Province

金属污染风险结果一致。这些结果均表明摄入过多慈姑、芦蒿和其他类水生蔬菜会对人体健康造成一定负面影响。

另一方面,从不同的摄食人群来看,儿童和成人同时摄食相同类型的水生蔬菜时,儿童受到的重金属健康风险要高于成人( $TTHQ_{\text{儿童}} > TTHQ_{\text{成人}}$ )。特别是慈姑、芦蒿、其他类蔬菜中重金属对儿童造成的健康风险要高于成年人。整体而言,云南省水生蔬菜中具有健康风险的重金属主要是砷和镉。蔬菜种类方面,慈姑和芦蒿带来的健康风险要高于其余种类。

### 3 结论

水生蔬菜因独特的生长环境更易受到重金属的污染,从而通过食物链对人体健康产生潜在毒害<sup>[43-44]</sup>。已有大量研究通过不同方法对水生蔬菜中的重金属含量及潜在健康风险进行研究。但是,也应注意本研究只是针对水生蔬菜的健康风险进行评估,而人类的饮食丰富多样。为此,在今后的研究中应加强对不同膳食结构食品的重金属含量特征分析,建立更完善的综合食品健康风险评估。另外,本研究结果还表明,儿童相比成年人对重金属有着更高的暴露风险。

表 6 不同种类水生蔬菜重金属污染指数  
Table 6 Heavy metal pollution indexes of different types of aquatic vegetables

样品类型	单因子污染指数					综合因子污染指数	污染等级	污染水平
	镉	铅	铬	汞	砷			
慈姑	0.18	0.31	0.13	0.10	0.48	0.38	安全	优良
茭白	0.06	0.40	0.02	0.10	0.23	0.29	安全	优良
菱角	0.12	0.25	0.03	0.10	0.18	0.19	安全	优良
芦蒿	1.02	0.44	0.09	0.10	0.31	0.70	安全	优良
莲藕	0.06	0.14	0.08	0.20	0.01	0.19	安全	优良
蒲菜	0.06	0.22	0.05	0.10	0.41	0.37	安全	优良
水芹菜	0.14	0.42	0.06	0.20	0.20	0.31	安全	优良
其他	0.10	0.65	0.08	0.40	0.77	0.54	安全	优良

表 7 不同种类水生蔬菜中单一重金属 THQ 和 TTHQ 评价结果  
Table 7 Evaluation results of THQ and TTHQ of single heavy metals in different types of aquatic vegetables

分组	样品类型	THQ					TTHQ
		镉	铅	铬	汞	砷	
儿童	慈姑	0.10	0.08	0.20	0.02	0.73	1.12
	茭白	0.03	0.10	0.04	0.02	0.34	0.53
	菱角	0.07	0.07	0.04	0.02	0.27	0.46
	芦蒿	0.56	0.11	0.13	0.02	0.47	1.30
	莲藕	0.03	0.04	0.12	0.03	0.02	0.24
	蒲菜	0.03	0.06	0.07	0.02	0.62	0.80
	水芹菜	0.08	0.11	0.09	0.03	0.31	0.62
	其他	0.05	0.17	0.12	0.06	1.17	1.59
	成人	慈姑	0.06	0.05	0.13	0.01	0.48
茭白		0.02	0.07	0.02	0.01	0.23	0.35
菱角		0.04	0.04	0.03	0.01	0.18	0.30
芦蒿		0.37	0.08	0.09	0.01	0.31	0.85
莲藕		0.02	0.02	0.08	0.02	0.01	0.16
蒲菜		0.02	0.04	0.05	0.01	0.41	0.52
水芹菜		0.05	0.07	0.06	0.02	0.20	0.41
其他		0.04	0.11	0.08	0.04	0.77	1.04

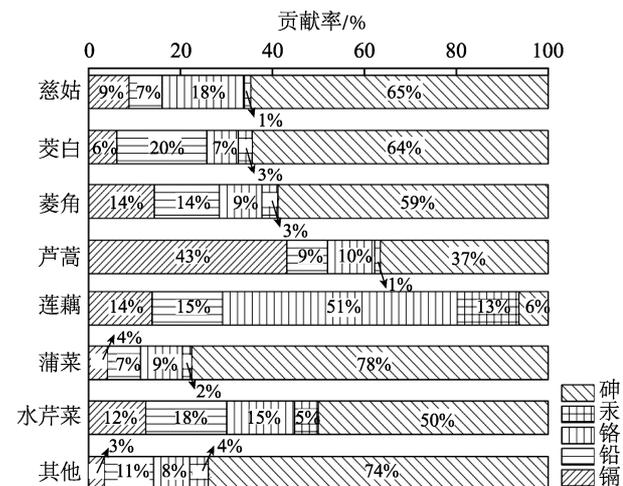


图 4 水生蔬菜中 5 种重金属 TTHQ 的贡献率

Fig.4 Contribution rates of TTHQ of 5 kinds of heavy metals in aquatic vegetables

本研究分析了云南省 16 个州市不同种类水生蔬菜中典型重金属(镉、铅、铬、汞、砷)含量特征,并基于 THQ 方

法对其造成的健康风险进行了定量评估。主要结论如下: 1) 云南省境内水生蔬菜中重金属含量水平总体处于正常水平, 5 种典型重金属的平均含量均未超过国家限量标准; 2) 水生蔬菜中重金属元素铅和砷显著正相关, 说明这两种元素具有相似的来源, 主成分分析结果也进一步证实了水生蔬菜中铅和砷的同源性, 这可能与云南省广泛分布的砷铅矿有关; 3) 在不同水生蔬菜种类中, 芦蒿的重金属综合因子污染指数最高, 已达到健康风险警戒范围, 其中镉的污染风险指数更是达到了轻度污染程度; 4) 健康风险方面, TTHQ 结果表明除了莲藕和芦蒿, 砷是其他水生蔬菜中健康风险贡献率最高的元素; 5) 儿童相比成年人更易受到水生蔬菜重金属的影响, 水生蔬菜中重金属对于儿童的风险指数均高于成年人, 其中芦蒿和慈姑两类对儿童的健康风险最高。本研究结论能为云南省水生蔬菜中有害元素的防治及科学合理指导居民膳食提供一定理论基础, 为今后更全面的膳食有害元素健康风险评估提供基础数据。

#### 参考文献

- [1] 吴曼, 宗义湘, 赵帮宏, 等. 中国水生蔬菜产业发展现状, 存在问题及发展思路[J]. 长江蔬菜, 2019, (2): 35-41.  
WU M, ZONG YX, ZHAO BH, *et al.* Development status, problems and development ideas of aquatic vegetables industry in China [J]. *J Changjiang Veget*, 2019, (2): 35-41.
- [2] 曹磊生, 江解增. 我国水生蔬菜生产科研现状及发展对策[J]. 中国蔬菜, 2002, (5): 1-3.  
CAO PS, JIANG JZ. Present situation and development countermeasures of aquatic vegetable production in China [J]. *Chin Veget*, 2002, (5): 1-3.
- [3] 柯卫东, 黄新芳, 李建洪, 等. 我国水生蔬菜科研与生产发展概况[J]. 长江蔬菜, 2015, (14): 33-37.  
KE WD, HUANG XF, LI JH, *et al.* General situation of scientific research and production development of aquatic vegetables in China [J]. *J Changjiang Veget*, 2015, (14): 33-37.
- [4] 柯卫东, 黄新芳, 刘玉平, 等. 云南省部分地区水生蔬菜种质资源考察[J]. 中国蔬菜, 2005, (2): 31-33.  
KE WD, HUANG XF, LIU YP, *et al.* Investigation on the germplasm resources of aquatic vegetables in parts of Yunnan Province [J]. *Chin Veget*, 2005, (2): 31-33.
- [5] 卢映祥, 施玉北, 孙涛, 等. 云南关键矿产重要矿床成矿系列[J]. 地质与勘探, 2021, 57(4): 693-727.  
LU YX, SHI YB, SUN T, *et al.* Minerogenetic series of key mineral deposits in Yunnan Province, China [J]. *J Geol Exp*, 2021, 57(4): 693-727.
- [6] 师红聪. 生态环境补偿机制下矿产资源价值评估与管理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.  
SHI HC. Research on management and value evaluation of mineral resources based on ecological environment compensation mechanism-A case study of mineral resources in Yunnan Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [7] 魏玲玲. 我国蔬菜重金属污染现状与治理措施研究[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(6): 38-41.  
WEI LL. Study on vegetable heavy metal pollution and control in China [J]. *J Agric Cat*, 2012, 2(6): 38-41.
- [8] NABI M. Heavy metals accumulation in aquatic macrophytes from an urban lake in Kashmir Himalaya, India [J]. *Environ Nanotechnol Monit Manage*, 2021, 16: 100509.
- [9] SIHLAHLA M, MOURI H, NOMNGONGO PN. Uptake of trace elements by vegetable plants grown on agricultural soils: Evaluation of trace metal accumulation and potential health risk [J]. *J Afric Earth Sci*, 2019, 160: 103635.
- [10] DÍAZ-LÓPEZ G, MARTÍNEZ-GARCÍA R, MEDINA P, *et al.* Toxicity of vegetable extracts in biological indicators of the aquatic and terrestrial environment [J]. *Toxic Lett*, 2021, 350: S196.
- [11] 王方园, 谢晓君, 龙珠, 等. 砷和汞在水生蔬菜及其生长环境中的迁移富集[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(2): 214-220.  
WANG FY, XIE XJ, LONG Z, *et al.* Study on migration and enrichment of arsenic and mercury in two aquatic vegetables and their surroundings [J]. *J Zhejiang Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, 40(2): 214-220.
- [12] 李富荣, 王琳清, 李文英, 等. 水芹对重金属的吸收累积及其应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2021, 30(12): 2423-2430.  
LI FR, WANG LQ, LI WY, *et al.* Research and application progress on heavy metal absorption and accumulation of *Oenanthe javanica* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2021, 30(12): 2423-2430.
- [13] 郭春风, 刘玲, 唐凤雪, 等. 常见湿生植物对镉、铅污染水环境的修复效果研究[J]. 植物科学学报, 2021, 39(5): 535-542.  
GUO CF, LIU L, TANG FX, *et al.* Remediation effects of common wetland plants on cadmium and lead-polluted water environment [J]. *Plant Sci J*, 2021, 39(5): 535-542.
- [14] 徐映如, 陈道湧, 沈俊毅, 等. 虹口区市售蔬菜重金属污染与健康风险评估[J]. 预防医学, 2021, 33(4): 406-410.  
XU YR, CHEN DY, SHEN JY, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of vegetables sold in Hongkou district [J]. *Prev Med*, 2021, 33(4): 406-410.
- [15] 李丁, 王济, 宣斌, 等. 贵阳南部近郊蔬菜重金属污染状况与健康风险评估[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11): 1362-1367.  
LI D, WANG J, XUAN B, *et al.* Heavy metals pollution and health risk evaluation of vegetables in southern suburb of Guiyang, China [J]. *Environ Pollut Control*, 2019, 41(11): 1362-1367.
- [16] 赵慧, 何博, 孟晶, 等. 典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1892-1902.  
ZHAO H, HE B, MENG J, *et al.* Accumulation characteristics and health risks of heavy metals in vegetables in typical urbanized areas [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2019, 27(12): 1892-1902.
- [17] FAN J, ZHAO L, KAN J, *et al.* Uptake of vegetable and soft drink affected transformation and bioaccessibility of lead in gastrointestinal track exposed to lead-contaminated soil particles [J]. *Ecotoxic Environ Saf*, 2020, 194: 110411.
- [18] 魏军晓. 北京市售食品重金属含量特征与健康风险评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.  
WEI JX. Assessment of human health risk based on characteristics of heavy metal content in foods sold in Beijing, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [19] 王桂安, 梁春穗, 黄琼, 等. 广东省居民主要膳食镉暴露风险的初步评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, 24(4): 353-357.  
WANG GAN, LIANG CH, HUANG Q, *et al.* Preliminary risk assessment on the dietary exposure of Cd in Guangdong residents [J]. *Chin J Food Hyg*, 2012, 24(4): 353-357.
- [20] 丁鸿, 杨杏芬. 环境镉危害早期健康效应风险评估的研究进展[J]. 国外医学, 2007, (5): 279-282.  
DING H, YANG XF. Research progress on risk assessment of early health effects of environmental cadmium hazards [J]. *J Environ Hyg*, 2007, (5): 279-282.
- [21] 苗超, 邵迪初. 职业性铅暴露人群血铅的危险因素研究[J]. 中国预防医学杂志, 2012, 13(3): 221-224.  
MIAO C, SHAO DC. Study on risk factors of blood lead among occupational workers exposed to lead [J]. *China Prev Med*, 2012, 13(3): 221-224.
- [22] 刘弘, 吴春峰, 陆屹, 等. 上海市居民膳食中铅镉暴露水平评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2011, 23(3): 218-223.  
LIU H, WU CF, LU Y, *et al.* Assessment on the dietary exposure of lead and cadmium in Shanghai residents [J]. *Chin J Food Hyg*, 2011, 23(3): 218-223.
- [23] 刘秀峰, 陈东宛, 吕金昌, 等. 北京市某区电镀厂周边居民主要膳食铅暴露风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2016, 26(8): 1163-1166.

- LIU XF, CHEN DW, LV JC, *et al.* Evaluation on the main dietary exposure of chromium to residents in area nearby electroplating factory in a district of Beijing [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2016, 26(8): 1163–1166.
- [24] 郑徽, 金银龙. 汞的毒性效应及作用机制研究进展[J]. *卫生研究*, 2006, 35(5): 663–666.
- ZHENG H, JIN YL. Toxic effects and the mechanism of mercury on health [J]. *J Hyg Res*, 2006, 35(5): 663–666.
- [25] 安建博, 张瑞娟. 低剂量汞毒性与人体健康[J]. *国外医学(医学地理分册)*, 2007, 28(1): 39–42.
- AN JB, ZHANG RJ. Low-dose mercury toxicity and human health [J]. *Foreign Med Sci (Sect Med)*, 2007, 28(1): 39–42.
- [26] 张维, 齐丽娟, 宁钧宇, 等. 砷的健康危害评估[J]. *毒理学杂志*, 2021, 35(5): 367–372, 378.
- ZHANG W, QI LJ, NING JY, *et al.* Health hazard assessment of arsenic [J]. *J Toxicol*, 2021, 35(5): 367–372, 378.
- [27] AHMED S, FATEMA TZ, MAHDI MM, *et al.* Health risk assessment for heavy metal accumulation in leafy vegetables grown on tannery effluent contaminated soil [J]. *Toxic Rep*, 2022, 9: 346–355.
- [28] 赵冬羽, 崔潇方, 叶绍青, 等. 衡水市售蔬菜中重金属含量分析及健康风险评价研究[J]. *山东化工*, 2021, 50(21): 238–240, 242.
- ZHAO LY, CUI XF, YE SQ, *et al.* Analysis of heavy metal content and health risk assessment in vegetables sold in Hengshui [J]. *Shandong Chem*, 2021, 50(21): 238–240, 242.
- [29] 黄飞飞, 张宁, 赵敏娟, 等. 2016—2018年苏州市水生蔬菜重金属污染状况分析及健康风险评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(2): 648–654.
- HUANG FF, ZHANG N, ZHAO MX, *et al.* Analysis of heavy metal pollution status and health risk assessment of aquatic vegetables in Suzhou from 2016 to 2018 [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(2): 648–654.
- [30] 郑丹, 崔文文, 夏珍珍, 等. 2019—2020年我国南方六省荸荠农药残留和重金属污染特征调查与膳食暴露风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(1): 287–295.
- ZHENG D, CUI WW, XIA ZZ, *et al.* Investigation of pesticide residues and heavy metal contamination characteristics and dietary exposure risk assessment of *Eleocharis tuberosa* from 2019 to 2020 in six provinces of Southern China [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(1): 287–295.
- [31] LIANG H, WU WL, ZHANG YH, *et al.* Levels, temporal trend and health risk assessment of five heavy metals in fresh vegetables marketed in Guangdong Province of China during 2014–2017 [J]. *Food Control*, 2018, 92: 107–120.
- [32] 李晓玉, 刘丽萍, 陈绍占, 等. 食用菌中砷、镉、汞、铅、铬的污染情况和健康风险分析[J]. *职业与健康*, 2019, 35(5): 613–617.
- LI XY, LIU LP, CHEN SZ, *et al.* Pollution and health risks analysis of arsenic, cadmium, mercury, lead and chromium in edible fungi [J]. *Occup Health*, 2019, 35(5): 613–617.
- [33] 冉俊, 马之攀, 龙昌洲, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定毛肚、鸭肠、黄喉中的 5 种污染物含量及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(15): 5220–5226.
- RAN J, MA ZP, LONG CZ, *et al.* Determination of 5 pollutants in tripe, duck intestine and yellow throat by inductively coupled plasma mass spectrometry and health risk assessment [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(15): 5220–5226.
- [34] 高培培, 肖冰, 刘文菊, 等. 莲藕中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. *环境化学*, 2020, 39(2): 362–370.
- GAO PP, XIAO B, LIU WJ, *et al.* Analysis and health risk assessment of heavy metal in lotus root [J]. *Environ Chem*, 2020, 39(2): 362–370.
- [35] 吴雨晨, 孙金芳, 孙宏, 等. 江苏省典型地区芦蒿中铅、镉的检测结果分析与污染状况评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(18): 6587–6593.
- WU YC, SUN JF, SUN H, *et al.* Detection results analysis and pollution status assessment of lead and cadmium in *Artemisia selengensis* from Jiangsu province typical area [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(18): 6587–6593.
- [36] 熊春晖, 卢永恩, 欧阳波, 等. 水生蔬菜重金属污染与防治研究进展[J]. *长江蔬菜*, 2012, (16): 1–6.
- XIONG CH, LU YEN, OUYANG B, *et al.* Research progress on pollution and prevention of heavy metals in aquatic vegetables [J]. *J Changjiang Veget*, 2012, (16): 1–6.
- [37] 王方园, 龙珠, 徐金玲, 等. 浙中地区水生蔬菜及其生长环境重金属污染调查与评价[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(3): 338–345.
- WANG FY, LONG Z, XU JL, *et al.* Risk assessment of heavy metals in aquatic vegetables and their growing environment in central Zhejiang [J]. *J Zhejiang Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 39(3): 338–345.
- [38] 方妍, 张萌萌, 孙瑞莲. Cd 和 Pb 在水芹菜中的累积及其与营养元素的关系[J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 64–72.
- FANG Y, ZHANG MM, SUN RL. Accumulation of cadmium and lead in water celery and its relationships with nutrients [J]. *Ecol Sci*, 2020, 39(5): 64–72.
- [39] 黄凯丰, 杨凯, 王雁, 等. 不同栽培介质中铅、镉在茭白产品中残留的差异[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(12): 4932–4934.
- HUANG KF, YANG K, WANG Y, *et al.* Difference on Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> residue in *Zizania latifolia* products on different cultivation media [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2008, 36(12): 4932–4934.
- [40] 李雅. 基于土壤发生分类的云南省土壤重金属空间分异及污染评估[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- LI Y. Spatial distribution and pollution assessment of soil heavy metals in Yunnan Province based on soil genetic classification [D]. Kunming: Yunnan University, 2019.
- [41] 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4414–4421.
- ZHANG JL, QU MK, CHEN J, *et al.* Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in Southwest China [J]. *Environ Sci*, 2021, 42(9): 4414–4421.
- [42] 张旭辉, 熊庆, 栗昉. 云南农田土壤中铅、镉、铬水平及分布规律[J]. *环境与职业医学*, 2019, 36(3): 238–241.
- ZHANG XH, XIONG Q, LI Y. Concentrations of lead, cadmium, and chromium in farmland soil in Yunnan [J]. *J Environ Occup*, 2019, 36(3): 238–241.
- [43] LUO C, LIU C, WANG Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 186(1): 481–490.
- [44] KUMAR S, PRASAD S, YADAV KK, *et al.* Hazardous heavy metals contamination of vegetables and food chain: Role of sustainable remediation approaches-A review [J]. *Environ Res*, 2019, 179: 108792.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介

张萌, 硕士研究生, 主要研究方向为有毒有害元素的地球化学循环与去除。  
E-mail: 3221135741@qq.com

张银烽, 博士, 讲师, 主要研究方向为有毒有害元素的地球化学循环与去除。  
E-mail: zhangyinfeng11@mails.ucas.ac.cn

赵晓慧, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品理化检验、食品安全。  
E-mail: zhaoxhyncdc@126.com