

# 湘莲不同器官中常见重金属含量检测 及富集特征分析

Detection and enrichment characteristics analysis of common heavy metal content in different organs of Hunan lotus seed

戴 慧<sup>1</sup> 赵文玉<sup>2,3</sup> 王建辉<sup>4,5</sup> 贺湘怡<sup>2</sup> 龙 潇<sup>2</sup>

DAI Hui<sup>1</sup> ZHAO Wenyu<sup>2,3</sup> WANG Jianhui<sup>4,5</sup> HE Xiangyi<sup>2</sup> LONG Xiao<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学化学化工学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 国家环境保护重金属污染监测重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 5. 湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114)

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Monitoring for Heavy Metal Pollutants, Changsha, Hunan 410114, China; 4. School of Food and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 5. Hunan Aquatic Resources Food Processing Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410114, China)

**摘要:**目的:了解湘莲种植区底泥及湘莲不同器官中常见重金属含量,进而探究湘莲各部位对重金属的富集转移特征。方法:以湖南省典型湘莲种植区为研究对象,通过 ICP-OES 检测底泥及湘莲不同器官中 Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn、Mn 含量;采用生物富集系数(BCF)和生物转移系数(TF)评价湘莲对重金属的富集转移特征。结果:底泥中 Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn、Mn 含量均值分别为 0.73, 176.28, 40.48, 27.61, 28.07, 95.57, 311.68 mg/kg, 与 NY/T 391—2021 限量值相比, Cd、Cr、Pb 含量的超标率分别为 100%, 75%, 10%。湘莲中 7 种重金属的最高富集器官:莲芯中为 Cd、Cu、Zn, 莲根中为 Cr、Pb, 去芯莲肉中为 Ni, 莲叶中为 Mn, 其含量均值分别为 0.20, 13.64, 78.58,

14.66, 2.23, 1.11, 924.03 mg/kg。仅莲茎和莲叶中的 BCF<sub>Mn</sub> 均值>1, 各器官中的 TF<sub>Cu</sub> 值均>1。结论:研究区以 Cd 污染相对严重;湘莲不同器官重金属含量不同,莲茎及莲叶对 Mn 有较强富集作用, Cu 在湘莲内转移能力较强。

**关键词:**湘莲;重金属污染;生物富集;生物转移

**Abstract:** Objective: The objective of this study is to investigate the heavy metal content in sediment and various organs of Hunan lotus seed in a planting area, as well as to explore the characteristics of heavy metal accumulation and transfer in Hunan lotus seed. Methods: A typical planting area in Hunan Province was selected for this research. The contents of Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, Zn and Mn were measured using an inductively coupled plasma emission spectrometer. The bioconcentration factor (BCF) and transfer factor (TF) were used to evaluate the heavy metal accumulation and transfer ability of Hunan lotus seed. Results: The average content of Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, Zn, and Mn in the sediment were 0.73, 176.28, 40.48, 27.61, 28.07, 95.57 and 311.68 mg/kg, respectively. Compared with the limit values of NY/T 391—2021, the exceeding rates of Cd, Cr, and Pb content are 100%, 75%, and 10%, respectively. The highest concentrations and contents of these 7 heavy metals were Cd, Cu

**基金项目:**国家环境保护重金属污染监测重点实验室开放基金(编号:SKLMHM202111);湖南省教育厅重点项目(编号:20A032);湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心开放基金(编号:2018KJY11)

**作者简介:**戴慧,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

**通信作者:**赵文玉(1974—),女,长沙理工大学副教授,博士。

E-mail: wenyuzh@csust.edu.cn

王建辉(1980—),男,长沙理工大学教授,博士生导师,

博士后。E-mail: wangjih0909@163.com

**收稿日期:**2023-12-12 **改回日期:**2024-02-21

and Zn in the lotus core, Cr and Pb in the root, Ni in the lotus-seed kernel and Mn in the leaves, with an average content of 0.20, 13.64, 78.58, 14.66, 2.23, 1.11 and 924.03 mg/kg, respectively. The  $BCF_{Mn}$  values for both stems and leaves exceeded 1. The  $TF_{Cu}$  values for all organs were greater than 1.

**Conclusion:** This study reveals that there is serious pollution from Cd within the study area. The content of heavy metals in different organs of Hunan lotus seed is different. Lotus stems and leaves has strong enrichment of Mn, and Cu had strong transfer ability in Hunan lotus seed.

**Keywords:** Hunan lotus seed; heavy metal pollution; bioconcentration factor; transfer factor

莲,在中国种植历史悠久,品种丰富,分布广泛,是一类重要的水生经济作物,根据用途可分为观赏和食用两大类,或进一步细分为藕莲、子莲、花莲三大类<sup>[1]</sup>。其中,湘莲特指湖南地区栽种的籽莲品种,主要包括寸三莲和以其为亲本培育的芙蓉莲、太空莲。莲作为一类典型的水生植物,多种植于水田中,种植周期长,维管束组织发达,易从底泥中吸收富集重金属<sup>[2]</sup>。其生长过程中需定期施加化肥农药、引水灌溉等,是其可能的重金属来源<sup>[3-4]</sup>;且荷塘多位于内湖,换水周期长,自我调节能力相对较弱<sup>[5]</sup>,因此荷塘存在一定的重金属污染风险,如王婧文等<sup>[5]</sup>发现东洞庭湖莲藕种植区底泥中 Cd 含量均值为 26.85 mg/kg,处于极重度生态风险水平。

现有的莲重金属含量检测分析及研究主要集中于藕莲<sup>[5-9]</sup>,对籽莲的种植环境以及不同器官的重金属研究较少。叶宏萌等<sup>[10]</sup>仅探究了福建白莲种植区荷塘底泥、莲子及莲叶中 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 等 7 种重金属含量及富集特征。湘莲重金属研究主要集中在莲子<sup>[11-12]</sup>、Cd 在各器官中的分布规律<sup>[2]</sup>以及种植区底泥重金属风险评价<sup>[13]</sup>。Cd 主要分布在湘莲莲根,与底泥中 Cd 含量存在明显正相关<sup>[2]</sup>;而莲子(未去芯)中 Cu、Cd 含量与底泥之间存在明显的正相关<sup>[13]</sup>。湖南作为有色金属大省,土壤环境中存在多种重金属,背景值相对偏高<sup>[14]</sup>。但多种常见重金属在湘莲不同器官中的富集及转移规律尚不明确,有关湘莲不同部位的多种重金属元素富集特征的研究尚未见报道。

目前,环境样品中重金属含量的检测方法主要包括原子吸收光谱法(AAS)、原子荧光光谱法(AFS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)、同位素稀释质谱法(IDMS)和电化学法等传统方法,以及如基于脱氧核酶的新兴检测法等<sup>[15-18]</sup>,其中 AAS 法和 AFS 法的检出限较差;ICP-MS 法和 ICP-OES 法的设备成本较高,但灵敏度较高且能够多元素同时分析;IDMS 法的准确度高但操作复杂;电化

学法的成本低、便于携带但检测限及稳定性有待提高;而基于脱氧核酶的检测法检测快速、可设计性强但尚不成熟。ICP-MS 法和 ICP-OES 法也是湘莲样品及底泥样品中的重金属含量检测的常用方法<sup>[11-13]</sup>。

研究拟以湖南省典型人工种植区的湘莲(包括根、茎、叶、莲蓬、莲壳、去芯莲肉及莲芯在内的 7 种器官)及其底泥为研究对象,采用 ICP-OES 法检测当地 7 种常见重金属元素(Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn、Mn)含量,基于生物富集系数(BCF)和生物转移系数(TF)评价湘莲对 7 种常见重金属元素的富集转移特征,旨在揭示常见重金属在底泥—湘莲系统中的富集与转移规律,为研究区莲籽的绿色安全生产研究提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

湘莲:太空莲,湘潭市湘潭县石鼓镇荷花基地和娄底市双峰县荷叶镇荷花基地;

硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

铅、镉、铬、锰、铜、锌、镍混合标液:1.0 mg/mL,国家标准物质中心。

#### 1.1.2 主要仪器设备

电子天平:ME204 型,上海梅特勒—托利多仪器公司;

粉碎机:FW-100 型,北京中兴伟业仪器有限公司;

石墨消解器:HD-X30 型,湖南昊德仪器设备有限公司;

微波消解仪:multiwave 5000 型,安东帕(上海)商贸有限公司;

电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES):5100VDV 型,安捷伦科技有限公司。

### 1.2 方 法

1.2.1 样品采集及预处理方法 按图 1 在湘莲种植基地各采集 10 组湘莲植株样品和对应的底泥样品(X1~X20)。将每个采样点采集的生长状况良好且长势、株高大致相同的 4 株植物拆分成根、茎、叶、莲蓬、莲壳、去芯莲肉及莲芯,均匀混合并编号分装;用木铲采集植物根际四周底泥(0~20 cm)均匀混合,封装于洁净的 500 mL 玻璃瓶中,贴上标签;准确记录采样点经纬度及周边情况,并及时将样品运回实验室。植物样品依次用自来水、纯水清洗,晾干,105 °C 下杀青,鼓风机干燥至恒重,粉碎过 60 目尼龙筛。采用四分法将底泥样品缩分至 100 g,鼓风机干燥至恒重,碾磨过 100 目尼龙筛。

#### 1.2.2 样品溶液制备

(1) 植物样品溶液:称取 0.500 0 g 植物样品于四氟

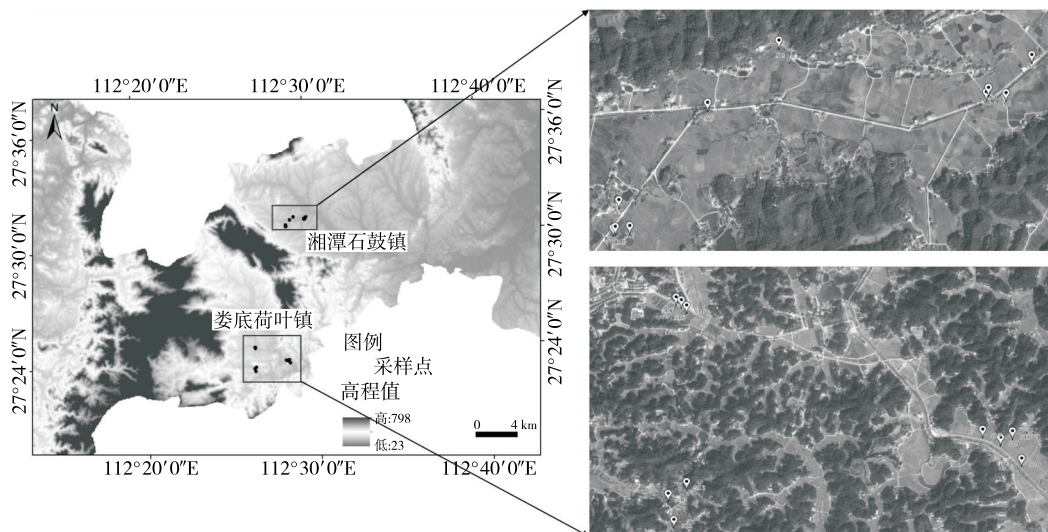


图 1 研究区采样点位分布图

Figure 1 Distribution map of sampling points in the study area

乙烯消解罐中,加入 10 mL 硝酸,120 °C 预消解至黄烟殆尽,加盖后微波消解 30 min,取出,160 °C 赶酸至糊状,加入 0.25 mL 硝酸,纯水定容。

(2) 底泥样品溶液:称取 0.250 0 g 底泥样品于四氟乙烯消解罐中,依次加入 10 mL 硝酸、5 mL 氢氟酸、2 mL 高氯酸,140 °C 消解 60 min,升至 180 °C 赶酸,待烟雾快消失升至 210 °C。赶酸至呈黄绿色不流动状态,加入 0.5 mL 硝酸,纯水定容。

1.2.3 检测方法 采用电感耦合等离子体发射光谱法,Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 和 Mn 的检测限分别为 0.2,0.2,3.0,0.9,0.2,0.5,0.1 μg/L。

1.2.4 生物富集系数(BCF)和生物转移系数(TF)测定

BCF 为湘莲某器官内某种重金属含量与底泥中对应的重金属含量的比值<sup>[19]</sup>,TF 为湘莲地上某器官内某种重金属含量与莲根中对应的重金属含量的比值<sup>[20-21]</sup>。

1.2.5 数据处理 采用 Excel 2019、IBM SPSS Statistics

26 软件进行统计学数据处理,采用 ArcMap 10.7、BigmapGIS Designer 以及 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 底泥重金属含量特征

由表 1 可知,底泥 pH 为  $6.92 \pm 0.32$ ,偏中性。底泥重金属平均含量为  $Mn(311.68 \text{ mg/kg}) > Cr(176.28 \text{ mg/kg}) > Zn(95.57 \text{ mg/kg}) > Pb(40.48 \text{ mg/kg}) > Cu(28.07 \text{ mg/kg}) > Ni(27.61 \text{ mg/kg}) > Cd(0.73 \text{ mg/kg})$ ,分别为湖南省土壤背景值<sup>[14]</sup>的 0.72,2.84,0.96,1.50,1.04,0.86,4.60 倍。变异系数可反映重金属受到人为干扰的程度与其空间分布的均匀性<sup>[23]</sup>,研究区重金属变异系数表现为  $Cr > Mn > Cu > Ni > Cd > Pb > Zn$ ,呈中等变异性,即受到一定的人为因素干扰。经单因素方差分析,重金属 Cd、Pb、Ni、Cu 含量差异性不明显;Cr、Zn、Mn 含量与其他重金属含量之间差异性明显( $P < 0.05$ )。

表 1 研究区底泥理化指标<sup>†</sup>

Table 1 Descriptive statistics of physicochemical properties in the sediment

项目	pH	重金属含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )						
		Cd	Cr	Pb	Ni	Cu	Zn	Mn
平均值	6.92	0.73 <sup>d</sup>	176.28 <sup>b</sup>	40.48 <sup>d</sup>	27.61 <sup>d</sup>	28.07 <sup>d</sup>	95.57 <sup>c</sup>	311.68 <sup>a</sup>
最大值	7.55	0.98	364.40	56.60	46.80	48.40	125.20	656.20
最小值	6.34	0.48	77.00	32.00	19.00	21.60	80.00	177.80
标准差	0.32	0.14	65.79	6.62	6.08	6.25	12.54	108.54
变异系数/%	46.39	19.62	37.32	16.35	22.02	22.27	13.12	34.82
背景值 <sup>[14]</sup>	—	0.16	62.00	27.00	32.00	27.00	99.00	431.00
限量值 <sup>[22]</sup>	—	0.30	120.00	50.00	—	60.00	—	—

<sup>†</sup> 小写字母不同表示研究区不同重金属元素间差异显著( $P < 0.05$ )。

与 NY/T 391—2021 限量值相比,研究区 Cd 含量均显著超过限量值,平均超标 2.43 倍;多数采样点 Cr 含量显著高于限量值,超标率为 75%,Pb 超标率为 10%,其余重金属含量未超过限量值;研究区 Cd 与 Cr 含量超过湖南省农田土壤 Cd 与 Cr 平均值水平<sup>[24]</sup>。现有标准暂未明确规定 Mn 含量的限量值,但根据已有研究,土壤中 Mn 的含量适中标准为 170~2 200 mg/kg,研究区底泥的 Mn 含量在此范围内。

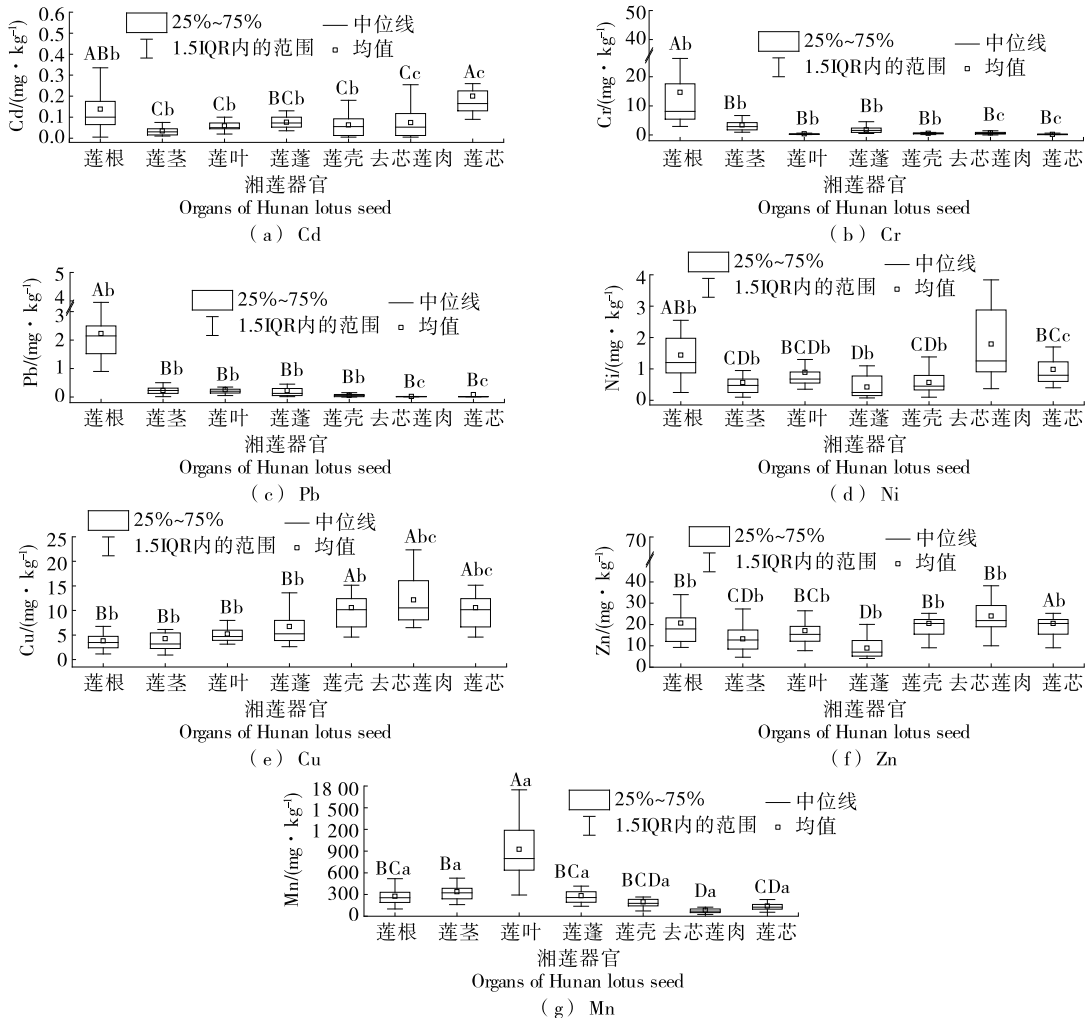
综上,研究区底泥存在一定浓度的重金属,且其空间分布不均匀。湖南省主要水系底泥重金属 Cd 污染相对严重<sup>[25]</sup>,该研究区底泥同样存在局部 Cd、Cr 与 Pb 污染风险,属于复合型污染,尤以 Cd 污染相对严重,应引起关注。

### 2.2 湘莲不同器官中的重金属含量

由图 2 可知,除莲根中 Cd 含量最低外,其余器官基本表现为 Mn 含量最高、Pb 含量最低。莲根、莲茎、莲叶、

莲蓬、莲壳中仅 Mn 含量显著高于其他 6 种重金属( $P < 0.05$ );去芯莲肉及莲芯中表现为 Mn、Zn、Cu 含量显著高于 Cd、Cr、Pb、Ni 含量( $P < 0.05$ )。

从单种重金属元素来看,Cd、Cu、Zn 在莲芯中的平均含量相对较高;Cr、Pb 在莲根中的平均含量相对较高,Ni 在去芯莲肉中的平均含量相对较高;而 Mn 在莲叶中的平均含量相对较高。Cd 在莲茎中的含量相对较低,Cr 在莲芯中的含量相对较低,Pb、Mn 在去芯莲肉中的含量相对较低,Ni、Zn 在莲蓬中的含量相对较低,Cu 在莲根中的含量相对较低。于辉等<sup>[2]</sup>研究表明,籽莲根部中 Cd 含量最高,其次是籽粒,而莲壳中含量最低,与试验结论存在差异。这可能是同一品种对同种重金属的吸收富集能力与植株根际环境中重金属的浓度、形态以及植株的基因组成、生长状况等有关<sup>[26-27]</sup>。有研究<sup>[28]</sup>表明,若籼稻品种缺少 *OsHMA3* 基因,将极大提高地上部分器官中的 Cd 含量。



大写字母不同表示同一重金属元素不同器官内差异显著( $P < 0.05$ );小写字母不同表示同一器官不同重金属元素间差异显著( $P < 0.05$ )

图 2 湘莲不同器官中重金属含量

Figure 2 Contents of heavy metals in different organs of Hunan lotus seed



去芯莲肉中 Ni 含量和莲芯中 Cd、Cu、Zn 含量高于其他器官,与叶宏萌等<sup>[10]</sup>的结论相似,即莲子中 Cd、Cu、Zn 含量比莲叶高。这可能由于莲根吸收土壤中 Cd、Ni、Cu 与 Zn 等重金属后,经木质部运输到茎、叶等器官,并通过再分配最终被固定在籽粒中。重金属元素会随植物主动/被动运输、光合作用产物等在植物体内进行重新分配<sup>[29]</sup>,该过程受植物体内螯合素等重金属化合物以及植物基因组等多重因素影响<sup>[30]</sup>。Mn 是植物进行光合作用的重要元素<sup>[31]</sup>,而莲叶是湘莲进行光合作用的主要器官,因此其 Mn 含量高于其他器官,与胡子逸等<sup>[32]</sup>的结论类似。

表 2 湘莲不同器官对重金属元素的生物富集系数(BCF)和生物转移系数(TF)<sup>†</sup>

Table 2 Bio-concentration factor and translocation factor of heavy metals in different organs of Hunan lotus seed

指标	器官	Cd	Cr	Pb	Ni	Cu	Zn	Mn
BCF	莲根	0.19 <sup>Bbc</sup>	0.09 <sup>Abc</sup>	0.06 <sup>Ac</sup>	0.06 <sup>ABc</sup>	0.14 <sup>Bbc</sup>	0.22 <sup>Ab</sup>	0.95 <sup>BCa</sup>
	莲茎	0.05 <sup>Cb</sup>	0.02 <sup>Bb</sup>	0.01 <sup>Bb</sup>	0.02 <sup>Cb</sup>	0.16 <sup>Bb</sup>	0.14 <sup>Cb</sup>	1.15 <sup>Ba</sup>
	莲叶	0.08 <sup>Cb</sup>	0.00 <sup>Bb</sup>	0.01 <sup>Bb</sup>	0.03 <sup>BCb</sup>	0.19 <sup>Bb</sup>	0.06 <sup>ABb</sup>	3.14 <sup>Aa</sup>
	莲蓬	0.11 <sup>BCbc</sup>	0.01 <sup>Bc</sup>	0.01 <sup>Bc</sup>	0.02 <sup>Cc</sup>	0.26 <sup>Bb</sup>	0.10 <sup>Cc</sup>	0.98 <sup>BCa</sup>
	莲壳	0.07 <sup>Ccd</sup>	0.00 <sup>Bd</sup>	0.00 <sup>Bd</sup>	0.02 <sup>Cd</sup>	0.39 <sup>Ab</sup>	0.22 <sup>Ac</sup>	0.69 <sup>BCDa</sup>
	去芯莲肉	0.10 <sup>BCc</sup>	0.00 <sup>Bd</sup>	0.00 <sup>Bd</sup>	0.07 <sup>Acd</sup>	0.45 <sup>Aa</sup>	0.26 <sup>Ab</sup>	0.29 <sup>Db</sup>
	莲芯	0.30 <sup>Abc</sup>	0.00 <sup>Bd</sup>	0.00 <sup>Bd</sup>	0.04 <sup>BCd</sup>	0.49 <sup>Aab</sup>	0.83 <sup>Ac</sup>	0.48 <sup>CDa</sup>
TF	莲茎	0.45 <sup>Bbc</sup>	0.45 <sup>Abc</sup>	0.12 <sup>Ac</sup>	0.51 <sup>Bbc</sup>	1.39 <sup>Ba</sup>	0.83 <sup>BCb</sup>	1.34 <sup>Ba</sup>
	莲叶	1.57 <sup>Bb</sup>	0.05 <sup>Bb</sup>	0.13 <sup>Ab</sup>	1.38 <sup>Bb</sup>	1.74 <sup>Bb</sup>	1.08 <sup>ABb</sup>	3.75 <sup>Aa</sup>
	莲蓬	1.13 <sup>Bb</sup>	0.22 <sup>Bc</sup>	0.12 <sup>Ac</sup>	0.37 <sup>Bc</sup>	1.95 <sup>Ba</sup>	0.51 <sup>Cc</sup>	1.09 <sup>BCb</sup>
	莲壳	0.91 <sup>Bb</sup>	0.07 <sup>Bc</sup>	0.03 <sup>Bc</sup>	0.62 <sup>Abc</sup>	3.19 <sup>Aa</sup>	1.20 <sup>ABb</sup>	0.77 <sup>BCDb</sup>
	去芯莲肉	2.60 <sup>Bab</sup>	0.09 <sup>Bb</sup>	0.01 <sup>Bb</sup>	1.96 <sup>Aab</sup>	3.81 <sup>Aa</sup>	1.41 <sup>Aab</sup>	0.32 <sup>Db</sup>
	莲芯	3.78 <sup>Aa</sup>	0.03 <sup>Bc</sup>	0.03 <sup>Bc</sup>	0.88 <sup>Ac</sup>	4.48 <sup>Abc</sup>	4.71 <sup>ABbc</sup>	0.54 <sup>BCc</sup>

<sup>†</sup> 大写字母不同表示同一重金属元素不同器官内差异显著( $P < 0.05$ );小写字母不同表示同一器官不同重金属元素间差异显著( $P < 0.05$ )。

2.3.1 对重金属的富集系数 植物对某重金属存在超富集能力的特征之一是 BCF 值 $>1$ <sup>[34]</sup>,由表 2 可知,湘莲各器官对 Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 的 BCF 值均 $<1$ ,富集能力较弱。而莲叶对 Mn 的 BCF 值为 3.14,与其他元素差异显著( $P < 0.05$ ),莲茎对 Mn 的 BCF 值 $>1$ ,说明莲叶、莲茎对 Mn 有较强富集作用。结合底泥中相应重金属含量可知,底泥中存在不同程度的 Cd、Cr、Pb 污染,但湘莲对 Cd、Cr、Pb 的富集能力较弱,而底泥中 Cu、Zn、Mn 含量未超过相应限量范围,但湘莲对 Cu、Zn、Mn 的富集能力较强。这可能说明研究区湘莲对重金属富集能力受底泥中重金属含量影响较小。Xiong 等<sup>[19]</sup>也发现莲藕中重金属的积累量与底泥中重金属含量无明显正相关。但于辉等<sup>[13]</sup>研究表明,莲子与底泥中的 Cu、Cd 含量之间存在显著正相关( $P < 0.01$ ),而 Cr、Pb、Mn 则无相关性。

土壤—植株间富集机制复杂<sup>[35-36]</sup>,不同产地、作物以及品种之间的重金属富集转移的研究结果间存在一定的差异性。不同产地的莲藕对 Pb、Cd 的吸收富集不

## 2.3 湘莲不同器官对重金属的富集特征

由表 2 可知,湘莲不同器官对不同重金属的富集、转移均存在较大差异。对于 Cd、Pb 等植物所非必需重金属元素 BCF 的变化范围为 0.00~0.19,TF 的变化范围为 0.01~3.78;对于 Cr、Ni、Cu、Zn、Mn 植物所必需重金属元素 BCF 的变化范围为 0.00~3.14,TF 为 0.03~4.71。这是由于作物会主动吸收生长所必需的重金属元素<sup>[33]</sup>,因此莲子及莲叶对必需重金属元素的富集性高于非必需重金属元素。湘莲不同器官对常见重金属的 BCF 值和 TF 值基本表现为富集系数低但转移系数高。

同<sup>[7]</sup>;水稻对 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 的富集能力均表现为茎 $>$ 米粒<sup>[37]</sup>;新疆红枣对 Ni 的吸收富集存在较大的品种差异<sup>[38]</sup>。总体上蔬菜对 Cr、Pb、Ni 的富集能力较弱<sup>[39]</sup>,该试验也存在相同现象,表现为湘莲各器官对 Cd、Cr、Pb 和 Ni 的 BCF 值均 $<0.30$ 。这可能是在淹水条件下,Cd 的溶解度较低<sup>[40]</sup>,而 Pb 又易与底泥中的有机物等结合<sup>[41]</sup>,均不易被湘莲吸收富集。Cr 和 Ni 作为植物生长必需的重金属元素,其在湘莲内富集不明显,可能与重金属在底泥中的存在形态等有关<sup>[42]</sup>。有研究<sup>[43-44]</sup>表明,植物不易吸收  $Cr^{3+}$ 。底泥 pH 是影响底泥中重金属的结合形态和生物有效性的重要因素<sup>[35]</sup>,试验研究区的底泥 pH 偏中性,可能导致底泥中重金属的生物有效性偏弱,进而影响湘莲对重金属的吸收富集。综上,有必要进一步检测底泥中重金属赋存形态,并分析其对重金属在湘莲不同器官中富集转移的影响。

2.3.2 对重金属的转移系数 TF 值 $>1$ ,表示该重金属在植物体内具有较强的转移能力<sup>[44]</sup>。由表 2 可知,7 种

重金属在湘莲各器官的转移系数顺序为 Cd: 芯>去芯莲肉>叶>莲蓬>壳>茎, 且在前 4 个器官中具有较强的转移能力; Cr: 茎>莲蓬>去芯莲肉>壳>叶>芯; Pb: 叶>茎=莲蓬>芯=壳>去芯莲肉, 且 Cr、Pb 在湘莲内转移能力较弱; Ni: 去芯莲肉>叶>芯>壳>茎>莲蓬, 且在去芯莲肉及莲叶中具有较强的转移能力; Cu: 芯>去芯莲肉>壳>莲蓬>叶>茎, 且在湘莲各器官中均具有较强的转移能力; Zn: 芯>去芯莲肉>壳>叶>茎>莲蓬, 且在莲芯、去芯莲肉、莲壳及莲叶中具有较强的转移能力; Mn: 叶>茎>莲蓬>壳>芯>去芯莲肉, 且在莲叶、莲茎及莲蓬中具有较强的转移能力。

总体上看, Cd、Ni、Cu、Zn 更倾向于转移进入莲子中, Pb、Mn 则在莲叶中较高, 而 Cr 易在茎中富集, 与双燕等<sup>[45]</sup>的结论类似。植物主要通过根系吸收重金属, 也有部分通过大气沉降吸收<sup>[46]</sup>, 莲叶表面积大, 受大气沉降影响相对显著, 而大气沉降是 Pb 进入土壤及植株的重要途径<sup>[47]</sup>, 这可能是莲叶对 Pb 生物转移系数较大的原因。Zheng 等<sup>[48]</sup>研究发现, 叶类蔬菜比其他蔬菜具有更高的 Pb 效应风险。

### 3 结论

分析了底泥—湘莲系统中湘莲各器官对底泥多种常见重金属的富集转移特征。结果表明, 湘莲种植区底泥表现为多种重金属复合型污染, 其中 Cd 超标需重点关注; 湘莲不同器官中同一重金属含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 同一器官中不同重金属间也存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 表现为莲芯中 Cd、Cu、Zn, 莲根中 Cr、Pb, 去芯莲肉中 Ni, 莲叶中 Mn 的平均含量相对较高; 湘莲各器官对重金属总体表现为低富集高转移。但底泥—湘莲系统微环境及重金属的不同赋存形态对重金属的富集转移影响效应有待进一步探究。

#### 参考文献

[1] 中国科学院武汉植物研究所. 中国莲[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-5.  
Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences. *Nelumbo nucifera*[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-5.

[2] 于辉, 彭佳师, 严明理. 镉在莲各器官中累积规律的研究[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 82-85.  
YU H, PENG J S, YAN M L. Research on the accumulation of cadmium in lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) organs[J]. Ecological Science, 2021, 40(1): 82-85.

[3] 张思维, 李东梅, 刘小云, 等. 甘肃产黄芪重金属含量特征分析及健康风险评估[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 38-42.  
ZHANG S W, LI D M, LIU X Y, et al. Analysis of heavy metal content and health risk assessment of *Astragalus membranaceus* in Gansu province[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 38-42.

[4] 杨小俊, 次仁德吉, 吴雪莲, 等. 西藏 4 地市糌粑中重金属含量分析与污染评价[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 71-77.  
YANG X J, Cirendjeji, WU X L, et al. Analysis of heavy metals content and pollution evaluation in Tsamba in four cities of Tibet[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(5): 71-77.

[5] 王婧文, 姚欣, 李有志, 等. 东洞庭湖莲藕种植区土壤重金属污染及其对莲藕重金属含量的影响[J]. 生态科学, 2017, 36(4): 46-51.  
WANG J W, YAO X, LI Y Z, et al. Heavy metal contamination in soils and their impact on heavy metal content in lotus in the East Dongting Lake[J]. Ecological Science, 2017, 36(4): 46-51.

[6] 刘玉玲. 莲藕中重金属含量的检测及健康风险评估[J]. 食品工程, 2022(3): 69-72.  
LIU Y L. Detection and health risk assessment of heavy metals in Lotus root[J]. Food Engineering, 2022(3): 69-72.

[7] 聂梅梅, 景绘丽, 李大婧, 等. 江苏不同产地莲藕中重金属含量及健康风险评估[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 186-190.  
NIE M M, JING H L, LI D J, et al. Determination and risk assessment of heavy metals in fresh lotus root from different producing areas of Jiangsu Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 186-190.

[8] 鲁潇, 于坤, 孙庆业, 等. 铜陵矿区周边莲藕重金属元素含量及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2 049-2 056.  
LU X, YU K, SUN Q Y, et al. Heavy metal content and health risk assessment of lotus roots around the Tongling mining area, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(9): 2 049-2 056.

[9] 顾涛, 朱晓华, 赵信文, 等. 广州新垦莲藕产区莲藕品质与地球化学条件的关系[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 833-845.  
GU T, ZHU X H, ZHAO X W, et al. Relationship between lotus root quality and geochemical conditions in the Xinken lotus root producing area of Guangzhou[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(6): 833-845.

[10] 叶宏萌, 李国平, 袁旭音, 等. 武夷山五夫荷塘底泥重金属含量及在莲不同部位的富集效应[J]. 福建农业学报, 2018, 33(1): 73-80.  
YE H M, LI G P, YUAN X Y, et al. Contents and enrichment coefficients of heavy metals in sediment and lotus grown in Pondsat Downtown Wuyishan City [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2018, 33(1): 73-80.

[11] 廖丽萍, 肖爱平, 冷鹃, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定湘莲中的 11 种元素[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 437-440.  
LIAO L P, XIAO A P, LENG J, et al. Determination of 11 elements in Hunan lotus seed by ICP-MS with microwave digestion[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 437-440.

[12] 姜涛, 施枝江, 陈林明, 等. ICP-MS 法测定不同产地莲子及莲子不同部位中 5 种重金属元素含量[J]. 亚太传统医药, 2018, 14(10): 55-58.  
JIANG T, SHI Z J, CHEN L M, et al. Determination of 5 heavy metal elements in lotus seed of different cultivations and parts by

- ICP-MS[J]. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, 2018, 14(10): 55-58.
- [13] 于辉, 严明理. 湘潭莲子种植区土壤和莲子重金属污染的生态风险评价[J]. *生态科学*, 2023, 42(3): 184-189.
- YU H, YAN M L. Ecological risk assessment of heavy metal in soil and lotus seeds in Xiangtan Lotus planting[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(3): 184-189.
- [14] 潘佑名, 杨国治. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 176-239.
- FAN Y M, YANG G Z. Background values and research methods of soils in Hunan Province[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 176-239.
- [15] 李俊生, 郭小瑞, 綦峥. 谷物中重金属来源、检测技术及膳食风险研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(23): 141-147.
- LI J S, GUO X R, QI Z. Advances in heavy metal sources, detection techniques and dietary risks in cereals[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(23): 141-147.
- [16] 袁建民, 何璐, 杨晓琼, 等. 微波消解 ICP-OES 法同时测定香茅草中 11 种微量元素[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(14): 69-73.
- YUAN J M, HE L, YANG X Q, et al. Simultaneous determination of 11 trace elements in *Cymbopogon citratus* by ICP-OES with microwave digestion[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(14): 69-73.
- [17] 丁可武, 代莉莉, 黄迪惠, 等. 基于 Bi-Co-BTC 电化学传感器检测食品中  $Zn^{2+}$   $Cd^{2+}$   $Pb^{2+}$  含量[J]. *食品与机械*, 2023, 39(9): 50-56.
- DING K W, DAI L L, HUANG D H, et al. Determination of  $Zn^{2+}$   $Cd^{2+}$   $Pb^{2+}$  in food base on Bi-Co-BTC electrochemical sensor[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(9): 50-56.
- [18] 曾瑜, 谌委菊, 全珂, 等. 基于脱氧核酶的食品安全快速检测方法研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(6): 205-212.
- ZENG Y, CHEN W J, QUAN K, et al. Progress in food safety rapid analysis based on deoxyribozyme[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(6): 205-212.
- [19] 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.
- [20] LI F R, WANG X, WANG F H, et al. A risk-based approach for the safety analysis of eight trace elements in Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) in China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(13): 5583-5590.
- [21] 骆子璇, 胡海波, 贾西川, 等. 湿地池杉不同营养器官富集重金属特征[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2022, 51(6): 767-773.
- LUO Z X, HU H B, JIA X C, et al. Enrichment characteristics of heavy metals in different vegetative organs of *Taxodium ascendens* wetland forests[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2022, 51(6): 767-773.
- [22] 农业农村部. 绿色食品产地环境质量: NY/T 391—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 7.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of PRC. Green food: Environmental quality for production area: NY/T 391—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021: 7.
- [23] 屈明华, 陈雄弟, 倪张林, 等. 浙江油茶产地土壤和果实金属元素含量特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(3): 259-268.
- QU M H, CHEN X D, NI Z L, et al. Characteristics and distributions of metal elements in *camellia oleifera* fruits and soil in production areas of Zhejiang Province[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2021, 29(3): 259-268.
- [24] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2822-2833.
- CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [25] 杨帆, 袁隆湖, 黎一夫, 等. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1934-1946.
- YANG F, YUAN L H, LI Y F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1934-1946.
- [26] 赵升, 欧阳凯, 罗绪强, 等. 贵阳市高雁垃圾填埋场周边土壤和农作物重金属污染特征及健康风险评价[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(2): 92-99.
- ZHAO S, OUYANG K, LUO X Q, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metal pollution in soil and crops near Gaoyan landfill in Guiyang City[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(2): 92-99.
- [27] 沈珺珺, 林亲录, 罗非君. 防治大米镉污染的生物及农作技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2018, 34(12): 172-175.
- CHEN J J, LIN Q L, LUO F J. Advances on biological and farming technology for the prevention and treatment of cadmium in rice[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(12): 172-175.
- [28] 冯凯璇, 杨亚春, 李江遐, 等. 不同类型水稻对镉(Cd)吸收、转运与富集的差异分析[J]. *四川环境*, 2023, 42(3): 350-356.
- PENG K X, YANG Y C, LI J X, et al. Differential analysis of Cd uptake, transport and enrichment in indica and japonica rice[J]. *Sichuan Environment*, 2023, 42(3): 350-356.
- [29] 李相楹, 何腾兵, 付天岭, 等. 重金属元素在土壤—蔬菜系统中的转移富集及其毒性机理研究进展[J]. *应用化工*, 2021, 50(7): 1932-1937.
- LI X Y, HE T B, FU T L, et al. Review of migration, bioaccumulation and toxicity of heavy metals in soil-vegetables system[J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(7): 1932-1937.
- [30] 王晶云, 李娟. 杂优水稻对土壤中铅和镉的吸收与分配[J]. *食品与机械*, 2016, 32(3): 49-52.

- WANG J Y, LI J. Uptake and distribution of Pb and Cd by hybrid rice in soils[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(3): 49-52.
- [31] 翁俊, 徐春和. 光合作用氧释放机理研究进展[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2003(2): 83-91.
- WENG J, XU C H. Progressive investigation on the molecular mechanism of photosynthetic oxygen evolution[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2003(2): 83-91.
- [32] 胡子逸, 黄红荣, 陈新平, 等. 大白菜不同层次营养价值和健康风险评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 114-120.
- HU Z Y, HUANG H R, CHEN X P, et al. Nutritional value and health risk assessment of different layers of Chinese cabbage[J]. *Food Science*, 2022, 43(3): 114-120.
- [33] 高婉莹, 王冬艳, 王兴佳, 等. 长春市黑土城乡交错区重金属地球化学特征及生态风险评价[J]. *世界地质*, 2023, 42(4): 749-760.
- GAO W Y, WANG D Y, WANG X J, et al. Geochemical characteristics of heavy metals in black soil peri-urban area and its evaluation of ecological risk[J]. *World Geology*, 2023, 42(4): 749-760.
- [34] 王鹏, 赵志忠, 马荣林, 等. 海南岛北部潮间带红树林对重金属的累积特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 842-846.
- WANG P, ZHAO Z Z, MA R L, et al. Bioaccumulation characteristics of heavy metal in intertidal zone sediments from northern Hainan Island[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 842-846.
- [35] WANG L, ZHANG Q Y, LIAO X Y, et al. Phytoexclusion of heavy metals using low heavy metal accumulating cultivars: A green technology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 413: 125427.
- [36] 杜宪正, 王涛, 邹路易, 等. 一株锌抗性菌株强化印度芥菜修复锌污染土壤的可行性研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2019, 38(10): 52-59.
- DU X Z, WANG T, ZOU L Y, et al. Feasibility of enhanced phytoextraction of Zn for contaminated soil with a zinc-resistant strain[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2019, 38(10): 52-59.
- [37] MAO C, SONG Y, CHEN L, et al. Human health risks of heavy metals in paddy rice based on transfer characteristics of heavy metals from soil to rice[J]. *Catena*, 2019, 175: 339-348.
- [38] 何伟忠, 闫巧俐, 郑力, 等. 新疆红枣镍含量差异分析及来源[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 111-115.
- HE W Z, YAN Q L, ZHENG L, et al. The analyses of nickel pollution in different source of jujube in Xinjiang[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(5): 111-115.
- [39] 翁城武, 黄伙水, 许彩霞. 蔬菜中 11 种重金属积累效应研究[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(13): 194-200.
- WENG C W, HUANG H S, XU C X. Study on the accumulation of 11 heavy metals in vegetables[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(13): 194-200.
- [40] MA J F, SHEN R F, SHAO J F. Transport of cadmium from soil to grain in cereal crops: A review[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 3-10.
- [41] 杨梦昕, 杨东璇, 李萌立, 等. 湘江长沙段沿岸常见农作物重金属污染研究: Zn、Cu、Pb 和 Cd 的富集规律及污染评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(1): 126-131.
- YANG M X, YANG D X, LI M L, et al. Studies of heavy metal pollution in 10 crops planted by Changsha section of Xiangjiang River: Enrichment and pollution evaluation of Zn, Cu, Pb and Cd[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(1): 126-131.
- [42] 程俊伟, 蔡深文, 黄明琴, 等. 贵州遵义锰矿区植物根际土壤中重金属形态迁移转化及风险评价[J]. *环境化学*, 2022, 41(9): 2 833-2 841.
- CHENG J W, CAI S W, HUANG M Q, et al. Heavy metal speciation migration transformation and risk assessment in plant rhizosphere soil of Zunyi manganese mineland, Guizhou [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(9): 2 833-2 841.
- [43] 田稳, 汪洁, 岳志强, 等. 西南典型种植区蔬菜重金属健康风险评估[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(2): 319-329.
- TIAN W, WANG J, YUE Z Q, et al. Health risk assessment of heavy metals in vegetables from typical planting areas in Southwest of China [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(2): 319-329.
- [44] 罗松英, 李秋霞, 邱锦坤, 等. 南三岛土壤-红树植物系统中重金属形态特征及转移转化规律[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1 409-1 416.
- LUO S Y, LI Q X, QIU J K, et al. Speciation characteristics, migration and transformation of heavy metals in Mangrove soil-plant system in Nansan Island [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1 409-1 416.
- [45] 双燕, 杨振鸿, 胡峰. 三峡库区地质高背景区土壤-油菜重金属转移特征[J]. *三峡生态环境监测*, 2023, 8(4): 56-65.
- SHUANG Y, YANG Z H, HU F. Migration characteristics of heavy metal elements between soil and rape in the high geological background area of three gorges reservoir region, China [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2023, 8(4): 56-65.
- [46] 朱臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 332-345.
- ZHU Z, YANG X D, XU Z Q, et al. Foliar uptake, translocation and accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 332-345.
- [47] HE B, WANG W, GENG R, et al. Exploring the fate of heavy metals from mining and smelting activities in soil-crop system in Baiyin, NW China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 207: 111234.
- [48] ZHENG S, WANG Q, YUAN Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China [J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126213.