

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022120603

曾宪平, 万继磊, 李密, 等. 黔中喀斯特高背景土壤-辣椒系统重金属含量特征及生态风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43(6): 1871-1880.  
ZENG Xianping, WAN Jilei, LI Mi, et al. Characteristics of heavy metals and assessments of ecological risks in cultivated soil-pepper system of Karst Areas[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (6): 1871-1880.

## 黔中喀斯特高背景土壤-辣椒系统重金属 含量特征及生态风险评估\*

曾宪平<sup>1</sup> 万继磊<sup>2</sup> 李密<sup>2</sup> 湛天丽<sup>3,4</sup> 文锡梅<sup>3\*\*</sup>

(1. 遵义市农村发展服务中心, 遵义, 563000; 2. 贵州省宸铭鑫农业科技有限公司, 贵阳, 551400; 3. 贵州省山地资源研究所, 贵阳, 550001; 4. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550001)

**摘要** 贵州喀斯特地区碳酸盐岩广泛分布, 土壤重金属含量显著高于其他地区. 人为干扰前, 土壤重金属处于高背景低活性的状态. 为了解贵州喀斯特地区耕地土壤和种植辣椒的重金属含量及其生态风险. 本研究以清镇市辣椒产地土壤为研究对象, 采用潜在生态风险指数法和生物富集法对土壤和辣椒重金属含量及其生态风险进行评价. 结果表明, 清镇市耕地土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 含量平均值分别为 0.75、0.74、111.85、33.50、109.62 mg·kg<sup>-1</sup>, Cd 和 As 含量平均值分别是国家标准 GB5618—2018 的 2.25 倍和 2.79 倍, 土壤重金属 Cd、As 和 Hg 存在显著正相关. 清镇市辣椒产地土壤重金属综合潜在生态风险指数 RI 呈轻微风险水平, 各乡镇差异较大 (51.13—228.59). 辣椒对 5 种重金属的富集系数均小于 1, 对 5 种重金属吸收能力较弱. 辣椒重金属 Cd 与土壤 pH 呈显著负相关. 建议当地农户耕作过程中注意土壤重金属的污染来源, 重点关注土壤重金属污染的累积风险.

**关键词** 喀斯特, 辣椒, 种植土壤, 重金属, 潜在生态分析.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

## Characteristics of heavy metals and assessments of ecological risks in cultivated soil-pepper system of Karst Areas

ZENG Xianping<sup>1</sup> WAN Jilei<sup>2</sup> LI Mi<sup>2</sup> ZHAN Tianli<sup>3,4</sup> WEN Ximei<sup>3\*\*</sup>

(1. Zunyi Rural Development Service Center, Zunyi, Guizhou, 563006, China; 2. Guizhou Chenmingxin Agricultural Technology Co., Ltd., Guiyang, 551400, China; 3. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang, 550001, China; 4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550001, China)

**Abstract** Carbonate rocks are distributed widely in karst areas in Guizhou Province, and the contents of soil heavy metals are significantly greater than those in other areas. Without human disturbance, soil heavy metals are of high background and low activity in karst areas. In this study, samples of soil and pepper were collected from pepper planting garden in Qingzhen City in Guizhou Province to understand the contents of soil heavy metals and their ecological risk, and to analyze contents of heavy metals in pepper from karst areas in Guizhou Province. The results showed that the

2022年12月6日收稿(Received: December 6, 2022).

\* 国家自然科学基金(41561075), 贵阳市科技计划项目(筑科合同[2021]3-4号, 筑科合同[2022]3-1号, 筑科合同[2021]3-27号)和贵州科学院青年基金(黔科院J字[2020]17号)资助.

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (41561075), Guiyang Science and Technology Plan Project (ZK Contract [2021] 3-4, ZK Contract [2022] 3-1, ZK Contract [2021] 3-27) and Youth Fund of Guizhou Academy of Sciences (QKYJZ [2020] 17).

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 0851-86826512, E-mail: wxm220706@163.com

average contents of Cd, Hg, As, Pb and Cr in the collected soil samples were  $0.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $0.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $111.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $33.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $109.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. The average contents of Cd and As were 2.25 times and 2.03 times of the value limited by the national standard (GB5618-2018), respectively. There were some significant positive correlations among Cd, As and Hg in soils. The comprehensive potential ecological risk index (RI) of soil heavy metals in pepper planting gardens in Qingzhen City was at a slight risk level, and considerable differences of RI were observed among different villages and towns (51.13—228.59). All of the enrichment coefficients of pepper to the studied heavy metals were less than 1, and this, probably, suggested that pepper is of weak absorption capacity to these heavy metals. It is also found that Cd in pepper was negatively correlated with soil pH. It is suggested that local farmers care the sources of heavy metal pollution during farming activities, and special attention should be paid on the accumulation risk of heavy metal pollution in soils.

**Keywords** karst, pepper, soil of origin, heavy metals, potential ecological analysis.

随着社会的快速发展和人们健康意识的不断提高,土壤重金属污染问题引起了人们广泛关注<sup>[1-3]</sup>.土壤重金属具有隐蔽性和不可逆性,可通过食物链富集在植物、动物和人体内累积<sup>[4-7]</sup>.耕地土壤受到化肥、农药等化学物质的长期使用,以及生产生活中“三废”污染,从而引起蔬菜中重金属含量超标或者富集,危害人类健康.有学者对辽宁某冶炼厂周边农田土壤与农产品重金属污染特征进行评价,发现农田土壤中 Cd、Hg、Zn、Pb 和 Cu 表现为较显著污染和富集,受 Cd 和 Pb 污染较严重的有花生、辣椒等蔬菜<sup>[8]</sup>.也有学者对昆明市某火电厂周边土壤及农作物中重金属潜在风险进行评估,发现土壤 Hg 含量超出背景值 4.14 倍, Cr 超出土壤背景值 1.06 倍<sup>[9]</sup>.前期有研究发现,某大型矿山尾矿附近农田土壤重金属含量超标严重,种植辣椒对 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 富集程度较高<sup>[10]</sup>.黔中喀斯特地区为重金属高背景值区域,加上人为活动的强烈干扰,该区域耕地土壤重金属含量会存在不同程度富集现象<sup>[11]</sup>.因此,系统研究耕地土壤重金属含量的差异,确立高背景重金属在土壤-植物系统的富集特征,是确定农业活动对高背景土壤重金属活化过程的前提.

辣椒是贵州喀斯特地区主要经济作物,种植面积大,是当地脱贫致富和乡村振兴的主要支柱产业.贵州喀斯特地区碳酸盐岩广泛分布,土壤重金属含量显著高于国内其他地区,是重金属暴露的高风险区域.曾庆庆等对贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布及来源解析,发现研究区域土壤大部分重金属含量已超过土壤背景值,并且存在一定程度的富集<sup>[12]</sup>.也有学者研究发现,贵州大部分地区土壤中 Cd 含量超过农用地土壤污染风险限量值,而辣椒又易富集 Cd、Hg 等元素<sup>[13]</sup>.也有研究显示,贵州喀斯特地区辣椒果实中 Cd 呈现不同程度的超标,遵义市某区域辣椒果实中 Cd 和 Cr 的量分别占其健康风险评估的 0.055%—17.09%、0.005%—3.41%<sup>[14]</sup>.清镇市位于西南黔中喀斯特山地中心区域,该区域喀斯特地貌连片发育、地质复杂多样,该区域原生状态下土壤重金属多处于“高背景,低活性”状态,但在农业活动介入后,高背景地区土壤重金属可能存在不同程度的“活化”现象,尤其是长期连续耕作区域农产品重金属暴露风险尚有诸多不确定性因素.

本研究以黔中喀斯特地区清镇市红枫湖、站街、卫城和麦格的 4 个乡镇为研究对象,通过采集辣椒耕地土壤及对应的植株样品,测定其中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 这 5 种重金属含量.同时采用潜在生态风险指数对土壤重金属的污染程度进行评价,利用食品中污染物限量标准和生物富集系数评估农作物吸收土壤重金属程度,以期当地农作物安全提供坚实保障和理论依据.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于贵州省清镇市,地处东经  $106^{\circ}07'$  至  $106^{\circ}33'$ ,北纬  $26^{\circ}21'$  至  $26^{\circ}59'$ .市境东西宽约 42.6 km,南北长约 55.7 km,总面积  $1386.6 \text{ km}^2$ .清镇市地貌类型主要为浅丘洼地、缓丘坡地及丘陵盆

地,地势较开阔.研究区域主要为喀斯特地形地貌地带,主要以碳酸盐类岩石为主.土壤类型主要为黄壤、黄棕壤和石灰土,地形地貌复杂,研究区域基岩出入,成土母质类型多样,主要有石灰岩、页岩、砂页岩和其他过渡类型的碳酸盐岩,由于自然条件下含矿岩系的风化成土过程以及矿业开发和城镇化等人为活动过程,导致喀斯特耕地土壤重金属存在异常高背景的特点.研究区域主要种植辣椒、玉米、水稻等经济作物,主要为水旱轮作.清镇市年平均气温 14.1 ℃,年均降水量 1024 mm,无霜期年均 283 d,属亚热带温暖季风气候.

## 1.2 样品采集与分析

于 2020 年 5 月,采用 GPS 定位,利用梅花型采样方法在清镇市红枫湖、站街、卫城和麦格的 4 个乡镇采集长期种植辣椒的耕地土壤样品(0—20 cm)和辣椒植株样品,辣椒植株样品为除根以外的地上部分,按茎、叶、果实分类采集样品,共采集土壤和植株样品分别为 70 个,采样点见图 1.对土壤样品进行前处理后,参照国家标准测定土壤和植株样品中重金属 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 含量<sup>[11]</sup>.

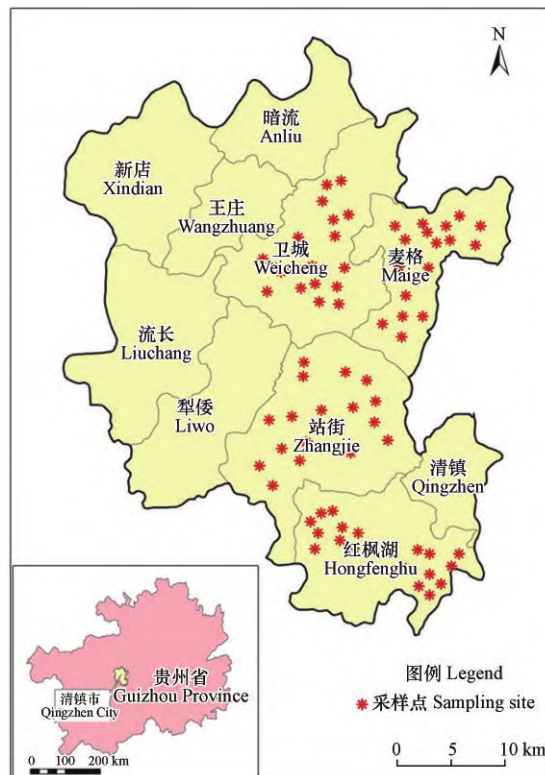


图 1 研究区域位置及采样分布图

Fig.1 Location and sampling sites distribution of the study area

土壤样品风干前处理后过尼龙网筛备测.土壤 pH 值采用电位法测定;土壤重金属 Cd、Pb、Cr 采用硝酸-氢氟酸-高氯酸三酸消解,使用电感耦合等离子体质谱仪测定;As、Hg 采用王水消解,使用原子荧光测定.植物重金属测定:准确称量 0.5 g 植物样品加入 5 mL 体积比为 4:1 的硝酸-高氯酸混合酸进行消解,然后采用 ICP-MS 测定 Cd、Pb、Cr,原子荧光测定 As、Hg<sup>[15]</sup>.每批样品测定样品过程中,均加入标准物质进行进行质量控制.

## 1.3 潜在生态危害评价方法

采用 Hakanson<sup>[16-17]</sup>提出的潜在生态风险指数法对研究区土壤重金属进行潜在生态风险评价.该方法综合考虑了多种重金属元素的环境背景值、毒性响应系数、污染水平以及环境敏感性等因素,是目前最为常用的评价土壤重金属污染程度和生态风险的方法.单一重金属元素潜在生态风险指数  $E_i$  和多项重金属元素综合潜在生态风险指数 RI 的计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n EI_i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{C_i}{C_r}$$

式中, RI 为多因子综合潜在生态风险指数, EI 为土壤中重金属元素  $i$  的单项重金属潜在生态风险指数,  $T_i$  为重金属元素  $i$  的毒性响应系数 ( $Cd=30, Hg=40, As=10, Pb=5, Cr=2$ ),  $C_i$  为重金属元素  $i$  的实测值 ( $mg \cdot kg^{-1}$ ),  $C_r$  为重金属的参比值, 本研究重金属背景值采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的土壤重金属元素背景值. EI 的生态风险程度分级为: 轻微风险、中等风险、较强风险等; RI 的生态风险程度分级标准为: 轻微风险、中等风险和较强风险等, 具体的分级数字和方法, 见参考文献<sup>[18]</sup>.

#### 1.4 富集系数法

生物富集系数 (Bioconcentration factor, BCF) 是表征化学物质被生物浓缩或富集在体内程度的指标, 在一定程度上反映了土壤中金属向植物体内迁移的难易程度, 体现了金属在植物体内的富集情况<sup>[19-22]</sup>. 计算公式如下:

$$BCF = \frac{\text{地上植物体内金属元素的含量}}{\text{土壤中重金属元素的含量}}$$

BCF 通常用来衡量植物对重金属积累能力大小. 富集系数越高, 则表明植物吸收重金属的能力越大; 相反, 富集系数越低则表明植物吸收重金属能力低<sup>[23-27]</sup>.

#### 1.5 数据统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 24.0 软件对数据进行数据处理、统计分析, Canoco 5.0 对数据进行冗余分析和相关性分析.

## 2 结果与讨论(Results and analysis)

### 2.1 土壤重金属元素含量特征

研究区域土壤 pH 和 5 种重金属含量统计学分析见表 1, 整个研究区耕地土壤 pH 介于 4.61—7.63 之间, 土壤 pH 平均值为 6.09, 整体呈趋势偏酸性. 耕地土壤 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的平均值分别为 0.75、0.74、111.85、33.50  $mg \cdot kg^{-1}$  和 109.62  $mg \cdot kg^{-1}$ , 参照《农用地土壤污染风险管控标准 GB 15618—2018》发现重金属 Pb 和 Cr 未超过农用地土壤风险筛选值, 而重金属 Cd、Hg、As 有部分超标现象. 黔中喀斯特地区是一种碳酸盐溶蚀形成的典型地貌, 该区域为地质高背景区域, 该区域成土母质自然分化形成的土壤自身重金属含量偏高<sup>[28]</sup>. 以此同时研究区土壤相对贫瘠, 为了提高农作物的产量, 而长期施用农药及化肥, 导致研究区域 Cd、Hg、As 有部分超标现象, 这与陈雅丽等人的研究结果一致<sup>[20]</sup>. 变异系数可以反映研究区域土壤重金属含量分布差异特征, 研究区土壤各项重金属元素的变异系数介于 0.11—0.38 之间, 属于中等程度变异<sup>[29]</sup>, 其中 Pb 和 Cr 的变异系数超过 0.30, 表明其两个元素受到外源干扰较大, 含量分布不均, 在土壤样品取样时需重点关注其污染来源.

表 1 研究区域土壤 pH 和 5 种重金属含量统计学分析

Table 1 Statistical analysis of soil pH and contents of five heavy metals in the study area

	Cd/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	Hg/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	As/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	Pb/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	Cr/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	pH
最大值	2.66	2.77	140.12	21.33	36.12	4.61
最小值	0.27	0.10	11.87	46.4	186.87	7.63
平均值	0.75	0.74	111.85	33.50	109.62	6.09
标准差	0.22	0.08	11.56	12.63	32.96	0.83
变异系数	0.29	0.11	0.10	0.38	0.30	0.14
偏度	2.19	4.21	4.31	0.09	2.34	0.20
峰度	3.88	18.05	18.69	0.32	7.18	0.49

清镇市 4 个乡镇土壤样品中重金属含量如表 2, 土壤重金属 Cd、Hg 和 As 含量最高的乡镇均为麦格, 分别为  $(1.1 \pm 0.86) mg \cdot kg^{-1}$ 、 $(1.82 \pm 0.43) mg \cdot kg^{-1}$  和  $(299.15 \pm 26.41) mg \cdot kg^{-1}$ , Pb 和 Cr 的含量最高的分别是卫城  $(39.35 \pm 5.25) mg \cdot kg^{-1}$  和红枫湖  $(209.18 \pm 99.9) mg \cdot kg^{-1}$ . Cd、Hg 和 Cr 含量最低的乡镇均为卫城,

其值分别为(0.38±0.07) mg·kg<sup>-1</sup>、(0.15±0.05) mg·kg<sup>-1</sup>和(77.2±9.34) mg·kg<sup>-1</sup>, As 和 Pb 含量最低值分别出现在红枫湖(14.62±2.65) mg·kg<sup>-1</sup>和麦格(28.42±5.76) mg·kg<sup>-1</sup>. 整体看,清镇市各乡镇间重金属 Cd、Hg、As 和 Cr 含量差异较大.

表 2 各样点土壤重金属含量特征(平均值±标准偏差)

Table 2 Characteristics of heavy metal contents in soil at various points (Mean±Standard deviation)

区域 Area	Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )
红枫湖 Hongfeng Lake	0.44±0.04	0.28±0.11	14.62±2.65	34±4.51	209.18±99.9
站街 Zhanjie	0.89±0.64	0.36±0.28	32.45±22.34	33.44±6.86	91.95±46.93
卫城 Weicheng	0.38±0.07	0.15±0.05	24.82±5.89	39.35±5.25	77.2±9.34
麦格 Maige	1.1±0.86	1.82±0.43	299.15±26.41	28.42±5.76	101.58±21.24

对比研究发现,4个乡镇土壤重金属含量存在不同程度超标现象.卫城土壤中 Pb 和红枫湖土壤中 Cr 重金属含量在清镇市4个乡镇相对较高,而未超过中国农田土壤重金属背景值.红枫湖、站街、卫城和麦格4个乡镇 Cd 含量均超过 GB 15618—2018 (0.3 mg·kg<sup>-1</sup>),分别为标准值的1.47、2.97、1.27、3.67倍.对 Hg 和 As 来说,4个乡镇中仅有麦格超过标准(Hg: 1.3 mg·kg<sup>-1</sup>、As: 40 mg·kg<sup>-1</sup>),分别为标准值1.4倍和7.48倍. Cr 含量在4个乡镇中仅有红枫湖一个乡镇超过标准(150 mg·kg<sup>-1</sup>),为标准的1.39倍.4个乡镇土壤中重金属 Pb 均远低于中国农田土壤背景值(70 mg·kg<sup>-1</sup>),Pb 未出现超标现象.土壤重金属 Cd 含量在4个乡镇分布都呈现为超标值,与喀斯特地区土壤形成过程中元素的地球化学性质发生淋溶和富集现象有关<sup>[30]</sup>.一方面是由于典型的喀斯特地貌成土母质的影响,另一方面是人为耕作施肥人为活动,致使生态环境受到破坏<sup>[31]</sup>.

## 2.2 土壤重金属潜在生态风险评价

各乡镇土壤重金属的单项潜在生态风险指数(EI)(表3),重金属 Cd 的 EI 最高.其中,麦格和站街的 EI 处于较强风险(80<EI≤160)水平,红枫湖的 EI 处于中等风险(40<EI≤80)水平,而卫城的 EI 处于轻微风险(EI<40)水平;除麦格的重金属 Hg 和 As 的 EI 处于中等风险水平,其余各镇的土壤重金属 Hg、As、Pb 和 Cr 的 EI 均处轻微风险.总体上来看,4个乡镇 Cd 重金属污染生态风险最大,Hg 潜在风险仅次于 Cd,Pb、Cr 重金属污染生态风险最小.麦格的重金属污染生态风险最大,RI 为 228.59,卫城的重金属污染生态风险最小,RI 为 51.13.清镇市麦格乡土壤重金属 As 严重超标,野外调查时发现麦格乡耕地周边设有工业区,因工业区生产过程中“废气、废渣、废水”三废排放,部分污染物排入耕地土壤,导致耕地土壤重金属 As 含量超标<sup>[32]</sup>.4个研究区域中 Cd 严重超标,Cr、Pb 污染程度低,且5种重金属分布差异大,与前人研究结果一致<sup>[33]</sup>.

表 3 土壤重金属潜在生态风险评价

Table 3 Potential ecological risk assessment of heavy metals in studied areas

区域 Area	EI-Cd	EI-Hg	EI-As	EI-Pb	EI-Cr	RI
红枫湖 Hongfeng Lake	43.97	4.65	4.87	1.42	2.09	57.00
站街 Zhanjie	89.03	7.93	8.11	1.86	1.23	108.17
卫城 Weicheng	38.34	3.37	6.21	2.19	1.03	51.13
麦格 Maige	110.33	40.54	74.79	1.58	1.35	228.59

## 2.3 辣椒对不同重金属的富集系数

研究区域4个乡镇辣椒植株各部位的重金属含量如表4所示,4个乡镇红枫湖、站街、卫城、麦格辣椒茎部分重金 Cd 含量分别为0.0005、0.0022、0.0120、0.0122 mg·kg<sup>-1</sup>,对应果实 Cd 含量为0.0002、0.0001、0.0034、0.0037 mg·kg<sup>-1</sup>,4个乡镇红枫湖、站街、卫城、麦格辣椒茎部分重金 Hg 含量分别为

0.0021、0.0012、0.0007、0.0017 mg·kg<sup>-1</sup>, 对应果实 Hg 含量为 0.0011、0.0003、0.0005、0.0007 mg·kg<sup>-1</sup>, 而叶片 Hg 含量达 0.0043、0.0015、0.0012、0.0028 mg·kg<sup>-1</sup>. 辣椒植株中 Cd、As 分布呈现基本相同的规律, 为茎部含量>叶部含量>果实含量; 而重金属 Hg、Pb 分布呈现基本相同的规律, 均为叶部含量>茎部含量>果实含量. Cr 在辣椒植株中的分布无明显特征, 于各部位累积量呈现随机性. 国家《食品中污染物限量》(GB 2762—2017) 给出辣椒中重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cr 限量标准, 分别为 0.05、0.01、0.5、1.0、0.5 mg·kg<sup>-1</sup>(鲜样). 据此此标准对研究区辣椒果实重金属含量超标情况判定, 发现 4 个乡镇辣椒重金属果实均未超标.

表 4 研究区辣椒植株各部位重金属含量(鲜样)

Table 4 Heavy metal content in different parts of pepper plants in the study area (fresh samples)

区域 Area	部位 Parts	Cd	Hg	As	Pb	Cr
红枫湖 Hongfeng Lake	茎	0.0005	0.0021	0.0005	0.0125	0.0322
	叶	0.0003	0.0043	0.0003	0.0198	0.0573
	果实	0.0002	0.0011	0.0002	0.0190	0.0276
站街 Zhanjie	茎	0.0022	0.0012	0.0016	0.0125	0.0722
	叶	0.0021	0.0015	0.0028	0.0158	0.1071
	果实	0.0001	0.0003	0.0008	0.0108	0.0392
卫城 Weicheng	茎	0.0120	0.0007	0.0013	0.0052	0.0522
	叶	0.0103	0.0012	0.0012	0.0073	0.1261
	果实	0.0034	0.0005	0.0010	0.0052	0.0402
麦格 Maige	茎	0.0122	0.0017	0.0011	0.0121	0.0757
	叶	0.0098	0.0028	0.0012	0.0157	0.1281
	果实	0.0037	0.0007	0.0007	0.0091	0.0766

生物富集系数可表征重金属在植物体内转移和富集程度, 4 个乡镇种植的辣椒生物富集系数值如表 5 所示, 研究表明土壤中 5 种重金属在辣椒产地土壤-植株中的转运能力不同, 4 个乡镇种植的辣椒对重金属的富集存在不同程度差异. 其中红枫湖和站街种植的辣椒对 Hg 富集能力最强, 分别为 0.03046 和 0.00844, 而卫城和麦格种植的辣椒对 Cd 的富集能力最强, 分别为 0.06771 和 0.02485. 红枫湖、站街、卫城和麦格 4 个乡镇种植的辣椒在 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 这 5 种重金属中对 As 的富集能力均最弱. 4 个研究区的辣椒对 5 种重金属的富集系数均小于 1, 表明 4 个乡镇种植的辣椒对这 5 种重金属的富集能力较低. 整体而言 4 个乡镇 5 种重金属在辣椒植株内部均呈现出 BCF<sub>Hg</sub> 和 BCF<sub>Cd</sub> 富集系数较大, BCF<sub>As</sub> 富集系数最小的规律. 黔中喀斯特地区成为重金属暴露的高风险地区, 但活性较低.

表 5 辣椒 BCF 值( $\times 10^{-3}$ )

Table 5 BCF value of pepper ( $\times 10^{-3}$ )

区域 Area	Cd	Hg	As	Pb	Cr
红枫湖 Hongfeng Lake	2.33	30.46	0.07	1.51	0.56
站街 Zhanjie	4.92	8.44	0.16	1.17	2.42
卫城 Weicheng	67.71	15.75	0.14	0.45	2.83
麦格 Maige	24.85	2.87	0.01	1.30	2.76

## 2.4 土壤与植物重金属相关性

清镇市辣椒种植土壤与植物间重金属相关性分析如图 2 所示, 土壤与植物之间的重金属存在不同程度的相关性. 其中土壤中 Cd 与植物中 Cd 在 0.01 水平上呈显著相关性, 土壤中 As 与植物中 Cd 在 0.001 水平上呈显著相关性, 土壤 pH 与植物 Cd 在 0.05 水平上呈显著相关性. 由此可知, 植物中的



Cd 与 As、Cd 以及 pH 呈显著相关性,而与土壤中的 Pb、As、Hg 相关性较弱.土壤 Cd 与土壤 Hg 在 0.05 水平上呈显著相关性,与植物 As 在 0.001 水平上呈显著相关,植物中 Hg 与植物中 Pb 在 0.001 水平上显著相关,植物中 Hg 与植物中 Cr 在 0.05 水平上显著相关,土壤中 As 与 Cd、Hg 分别在 0.001、0.05 水平上呈显著相关性.

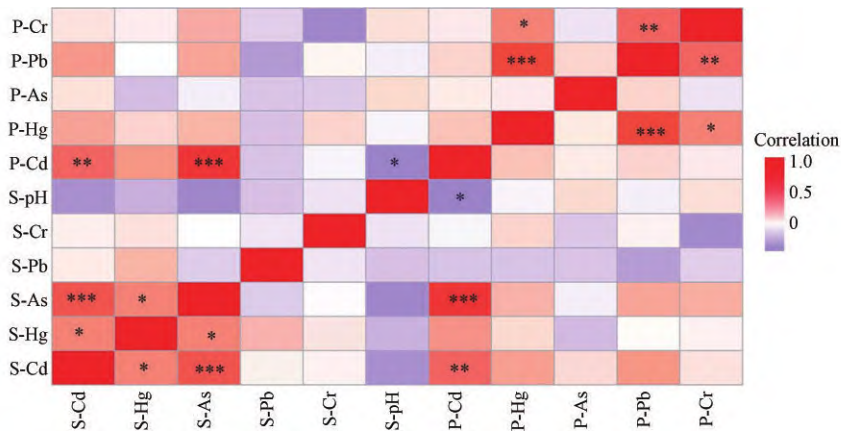


图 2 土壤与植物重金属 Spearman 相关性热图

注: S-metal 为土壤的重金属, P-metal 为植物的重金属, \*表示在 0.05 水平上显著, \*\*表示 0.01 水平显著, \*\*\*表示 0.001 水平显著

Fig.2 Heat map of Spearman correlation between soil and plant heavy metals

Note: S-metal is heavy metal in soil, P-metal is heavy metal in plants, \* means significant at 0.05 level, \*\* means significant at 0.01 level

总体而言,土壤中的重金属不仅与植物存在一定的密切联系,土壤中各类重金属元素也存在一定关系.结合土壤-植物重金属的相关性分析可知,植物重金属 Cd 与土壤 As、Cd 呈极显著正相关,与土壤 pH 值呈显著负相关.土壤 pH 值的升高可以提高黏土和有机质的螯合能力,促进土壤的吸附能力,减少重金属的解吸,从而降低重金属在土壤中的生物有效性<sup>[34]</sup>.辣椒是一种极易富集重金属 Cd 的经济作物<sup>[35]</sup>,本研究区域土壤重金属 Cd 具有潜在的高生态风险性.因此,在高背景区域中需要极其关注土壤重金属 Cd,由于辣椒中 Cd 与 pH 在 0.05 水平上呈现显著负相关关系,建议当地农户耕作过程中注意土壤酸碱度,控制土壤重金属污染的累积风险.

### 2.5 土壤与植物重金属的冗余分析

冗余分析是用于判断各个物质之间的一个相关性,是在已知的环境因子中寻找最能影响物种变化的解释变量.由图 3 可得出物种的分布、物种与环境因子之间关系及不同环境因子之间关系.其中,蓝色箭头表示环境因子,即 5 种土壤重金属元素的含量及土壤 pH 值.红色箭头表示物种,即 5 种植物重金属.各个环境因子与物种箭头之间的夹角用来体现环境因子与物种的相关性,通过研究发现,该区域辣椒重金属 Cr、Pb、Hg 与环境因子间主要表现为正相关.辣椒重金属 Cr 主要受土壤 pH 值、Cr 的影响呈正相关,Cd、Pb、As 对其影响不大,与土壤 Hg 呈负相关;辣椒重金属 Pb 主要受土壤重金属 Cr、Cd、As、Hg 的影响;对辣椒重金属 Hg 影响较大的环境因子是土壤 pH 值和 Cr、Pb.辣椒重金属 As 主要受土壤重金属 Cr、As、Hg、Cd 和土壤 pH 的影响,与土壤重金属 Pb 影响较弱呈正相关;辣椒重金属 Cd 主要受土壤重金属 Cd、Pb、pH 和 As 的影响.土壤重金属与辣椒所富集的重金属存在一定的密切关系.

土壤是一个复杂的环境系统,通过分析辣椒吸收重金属含量可知,吸收量与土壤重金属固有的含量不完全呈比例关系.冗余分析结果可知,影响辣椒 Hg、Cd 较大的环境因子有土壤 pH 值、Cr、Pb 等.辣椒对某一重金属元素的吸收不仅与土壤 pH 值含量有关,还与土壤中其他重金属元素有着密切联系,即存在着复杂的交互作用<sup>[36]</sup>.人为长期施肥等干扰,导致辣椒耕地土壤环境因子也成为一个重要因素,辣椒的种植过程以及辣椒的生长发育或多或少地引入农药与化肥,剂量的不可控、常年的日积月累,导致 Cd 成为高生态风险的重要诱因<sup>[37]</sup>.Hg 在研究区域没有超标现象,但具有潜在风险.随着种植年限的延长以及农药、化肥、污水灌溉的施入,需要重点关注土壤重金属活性变化的主要影响因素.

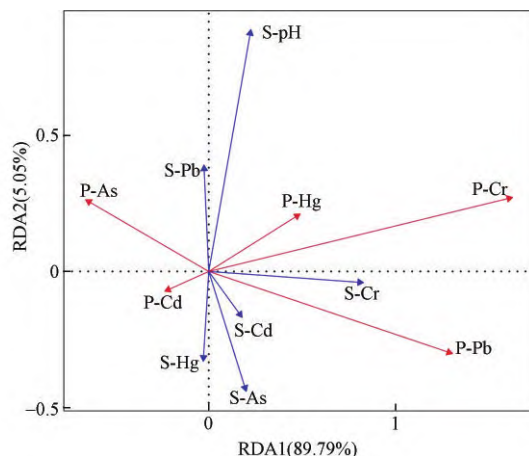


图3 土壤重金属与植物重金属间的冗余分析  
注: S-metal 是土壤的重金属, P-metal 植物的重金属.

Fig.3 Redundancy analysis of heavy metals in soil and plants  
Note: S-metal is heavy metal in soil, P-metal is heavy metal in plants.

### 3 结论(Conclusions)

(1) 清镇市辣椒产地土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的平均值分别为 0.75、0.74、111.85、33.50、109.62  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 4 个乡镇重金属 Cd 污染生态风险最大, 重金属 Pb、Cr 污染生态风险最小。

(2) 清镇市辣椒产地土壤各重金属单项潜在生态风险指数的平均值大小顺序依次为:  $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr}$ 。综合潜在生态风险指数呈现轻微风险水平, 各重金属在辣椒植株内的转运累积呈现出不一样的规律, 但辣椒对 5 种重金属的富集系数均小于 1。研究区耕地土壤重金属呈现出高背景值、低活性和低生态风险的特点, 4 个乡镇辣椒产地土壤重金属存在部分超标现象, 但辣椒果实中重金属未超出食用限量。

(3) 辣椒的重金属 Cr 与 Hg、Pb 间显著正相关, 辣椒的重金属 Cd 与土壤 pH 显著负相关。黔中喀斯特地区椒种植土壤中 Cr 与 Hg、Pb 的污染来源可能相同, 辣椒种植过程中应特别关注 Cr 与 Hg、Pb 的交叉污染, 同时也要注意土壤酸碱度对重金属 Cd 的影响。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 等. 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价 [J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 221-229.  
LIU X Y, CHEN M B, LI L Z, et al. Contaminant characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils from lead-zinc melting plant in Huize County, Yunnan Province, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(3): 221-229 (in Chinese).
- [ 2 ] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 573-582.  
MU L, WANG Y H, XU Y P, et al. Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a County of Hunan Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3): 573-582 (in Chinese).
- [ 3 ] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价 [J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3487-3496.  
CHEN J D, DAI Q G, XU X H, et al. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3487-3496 (in Chinese).
- [ 4 ] 庞文品, 秦樊鑫, 吕亚超, 等. 贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1468-1478.  
PANG W P, QIN F X, LYU Y C, et al. Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren County, Guizhou Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1468-1478 (in Chinese).
- [ 5 ] 石占飞, 王力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1150-1158.  
SHI Z F, WANG L. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining Area [J]. Journal of



- Agro-Environment Science, 2013, 32(6): 1150-1158 (in Chinese).
- [ 6 ] KANINGA B, LARK R M, CHISHALA B H, et al. Crop uptake of heavy metals in response to the environment and agronomic practices on land near mine tailings in the Zambian Copperbelt Province[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(9): 3699-3713.
- [ 7 ] KHARAZI A, LEILI M, KHAZAEI M, et al. Human health risk assessment of heavy metals in agricultural soil and food crops in Hamadan, Iran[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 100: 103890.
- [ 8 ] 都雪利, 李波, 崔杰华, 等. 辽宁某冶炼厂周边农田土壤与农产品重金属污染特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2249-2258.
- DU X L, LI B, CUI J H, et al. Assessment of heavy metal pollution and risk of farmland soil and agricultural products around a smelter in Liaoning[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2249-2258 (in Chinese).
- [ 9 ] 李瑾, 王平艳, 李艳丽, 等. 火电厂周边土壤污染及农作物重金属的累积特征评价[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(3): 87-92, 127.
- LI J, WANG P Y, LI Y L, et al. Evaluation of soil pollution around thermal power plants and accumulation characteristics of heavy metals in crops[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(3): 87-92, 127 (in Chinese).
- [10] 吴先亮, 黄先飞, 李朝婵, 等. 黔西煤矿区土壤重金属污染水平及其形态[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 335-341.
- WU X L, HUANG X F, LI C C, et al. Soil heavy metal pollution degrees and metal chemical forms around the coal mining area in western Guizhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 335-341 (in Chinese).
- [11] 何绪文, 王宇翔, 房增强, 等. 铅锌矿区土壤重金属污染特征及污染风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(5): 476-483.
- HE X W, WANG Y X, FANG Z Q, et al. Pollution characteristics and pollution risk evaluation of heavy metals in soil of lead-zinc mining area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(5): 476-483 (in Chinese).
- [12] 曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 等. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 102-113.
- ZENG Q Q, FU T L, ZOU H Q, et al. Spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of County in Guizhou Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(1): 102-113 (in Chinese).
- [13] 王兴富, 黄先飞, 胡继伟, 等. 喀斯特山地 Ni-Mo 废弃矿区周围镉污染及农作物富集特征[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1872-1882.
- WANG X F, HUANG X F, HU J W, et al. Cadmium pollution and bioconcentration characteristic in crops around the abandon Ni-Mo mining area in the Karst mountainous[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(7): 1872-1882 (in Chinese).
- [14] 王庆麟, 樊磊磊, 程俊伟, 等. 遵义某地辣椒果实中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 绿色科技, 2020(18): 56-59.
- WANG Q H, FAN L L, CHENG J W, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of pepper fruit in Zunyi[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(18): 56-59 (in Chinese).
- [15] 刘霏珈, 吴克宁, 罗明, 等. 农用地土壤重金属超标评价与安全利用分区[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 254-262.
- LIU P J, WU K N, LUO M, et al. Evaluation of agricultural land soil heavy metal elements exceed standards and safe utilization zones[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23): 254-262 (in Chinese).
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 孙境蔚. 铁观音茶园土壤-茶树体系中金属的迁移特征及来源解析[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
- SUN J W. Migration and source analysis of metals in soil-tea plant system of tieguanyin tea garden[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020 (in Chinese).
- [18] LUI W X, LI H H, LI S R, et al. Heavy metal accumulation of edible vegetables cultivated in agricultural soil in the suburb of Zhengzhou city, people's republic of China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, 76(1): 163-170.
- [19] 张亚静, 汪涛, 郭巧生, 等. 野菊对 Cd 元素吸收特性及其对药材品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(4): 641-647.
- ZHANG Y J, WANG T, GUO Q S, et al. Effect of *Chrysanthemum indicum* on absorption characteristics of Cd and its effect on quality of medicinal materials[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(4): 641-647 (in Chinese).
- [20] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.
- CHEN Y L, WENG L P, MA J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2219-2238 (in Chinese).
- [21] 张小敏, 张秀英, 钟大洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.
- ZHANG X M, ZHANG X Y, ZHONG T Y, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692-703 (in Chinese).
- [22] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 879-885.
- HU G C, ZHANG L J, QI J Y, et al. Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 879-885 (in Chinese).

- [23] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析 [J]. 地理学报, 2006, 61(3): 297-310.  
CHEN T B, SONG B, ZHENG Y M, et al. A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 297-310 (in Chinese).
- [24] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.  
CHEN T B, WEI C Y, HUANG Z C, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* and its arsenic enrichment characteristics[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(3): 207-210 (in Chinese).
- [25] 李静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn) 在玉米植株不同器官中的分布特征 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 244-247.  
LI J, YI Y L, LI L L, et al. Distribution of heavy metal(Cd, Pb, Cu, Zn) in different organs of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(4): 244-247 (in Chinese).
- [26] 宋波, 唐丽嵘. 桂林市土壤和蔬菜镉含量调查及食用安全性评估 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 238-242.  
SONG B, TANG L R. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Guilin and food safety assessment of vegetables[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(3): 238-242 (in Chinese).
- [27] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 157-162.  
HE T B, DONG L L, LIU Y S, et al. Change of physical-chemical properties and heavy metal element in soil from different parent material/rock[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 157-162 (in Chinese).
- [28] 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 (in Chinese).
- [29] ZHAO M, ZENG C, LIU Z H, et al. Effect of different land use/land cover on Karst hydrogeochemistry: A paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 388(1/2): 121-130.
- [30] 张倩, 韩贵琳. 贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 [J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3269-3277.  
ZHANG Q, HAN G L. Speciation characteristics and risk assessment of soil heavy metals from Puding Karst critical zone, Guizhou Province[J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 3269-3277 (in Chinese).
- [31] BI X Y, FENG X B, YANG Y G, et al. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China[J]. Environment International, 2006, 32(7): 883-890.
- [32] 朱恒亮, 刘鸿雁, 龙家寰, 等. 贵州省典型污染区土壤重金属的污染特征分析 [J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 505-512.  
ZHU H L, LIU H Y, LONG J H, et al. Pollution characteristics of heavy metals in soils in typical contaminated areas, Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2014, 42(4): 505-512 (in Chinese).
- [33] 李姗姗, 曹广超, 石平超, 等. 青岛城区土壤重金属元素空间分布及其现状评价 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 112-117.  
LI S S, CAO G C, SHI P C, et al. Status quo and evaluation of the spatial distribution of heavy metals in urban soil of Qingdao City[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(1): 112-117 (in Chinese).
- [34] 张宏泽, 崔文刚, 黄月美, 等. 黔中喀斯特地区临近矿区耕地土壤重金属污染评价及其源解析 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 412-421.  
ZHANG H Z, CUI W G, HUANG Y M, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of farmland soil around the mining area of Karst region of central Guizhou Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 412-421 (in Chinese).
- [35] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1680-1694.  
MAMETI TURSUN A, AJI GULI M, ANIWAR M, et al. Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1680-1694 (in Chinese).
- [36] LI Q H, LI C F, LIU L J, et al. Geochemical characteristics of heavy metals of bedrock, soil, and tea in a metamorphic rock area of Guizhou Province, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(3): 7402-7414.
- [37] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 重金属污染评价方法 (TCLP) 评价资江流域土壤重金属生态风险 [J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1582-1589.  
LIU C Z, HUANG Y Z, LEI M, et al. Assessment of ecological risks of heavy metal contaminated soils in the Zijiang River region by toxicity characteristic leaching procedure[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(9): 1582-1589 (in Chinese).