

余飞, 罗恺, 王佳彬, 等. 重庆岩溶地质高背景区土壤-农作物系统重金属累积特征及影响因素[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 71-83.

DOI: 10.11932/karst20230106

# 重庆岩溶地质高背景区土壤-农作物系统 重金属累积特征及影响因素

余飞, 罗恺, 王佳彬, 李瑜, 周皎, 王锐, 余亚伟, 张云逸

(重庆土地质量地质调查重点实验室, 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038)

**摘要:** 为了揭示重庆岩溶地质高背景区土壤-农作物系统中重金属的迁移累积特征, 选择在重庆市南部典型岩溶区, 系统地采集大宗农作物(水稻、玉米和红薯)及其耕层土壤84组, 分析测定农作物及耕层土壤中重金属砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、镍(Ni)、锌(Zn)含量及理化性质, 采用地统计、生物富集因子及皮尔逊相关系数分析等方法, 开展重金属元素在重庆岩溶地质高背景地区土壤-农作物系统中累积特征及影响因素。结果表明, 研究区水稻田、玉米地和红薯地耕层土壤重金属平均含量均高于重庆市和全国表层土壤背景值, 呈现不同程度的积累, 其中Cd元素富集现象较为突出。依据GB 15618-2018和GB 2762-2017, 耕层土壤种Cd超标率达41.59%, 水稻、玉米和红薯中Cd超标率分别为5.89%、6.25%和5.56%, 显示出岩溶地质高背景区虽然土壤中重金属含量总量高, 但生物有效性较低。相关分析显示, 土壤-农作物系统Cd等重金属含量主要受土壤pH、土壤质地和土壤中锰氧化物影响。

**关键词:** 岩溶地质高背景区; 土壤-农作物系统; 重金属; 富集系数

**中图分类号:** P595; X142 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2023)01-0071-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

《全国土壤污染调查公报》数据显示, 我国西南地区广泛发育岩溶地貌, 母岩在成土过程中易造成土壤中重金属的富集, 是我国土壤重金属污染较为突出的地区之一<sup>[1]</sup>。土壤重金属污染不仅影响土壤性质和功能、降低农产品的产量和质量, 而且可以通过农作物累积进入食物链, 危及人体健康<sup>[2-3]</sup>。如果人体长期处于Cd污染下, 会引发癌症、肝脏及肾脏衰竭, 长期食用富Cd农作物, 则会导致“痛痛病”<sup>[4]</sup>。

人为污染和地质背景是土壤重金属的两种主要

来源, 前者主要是工业、农业生产和城市生活带来的污染, 后者主要是由成土母质本身重金属含量高, 在岩石风化成土过程中发生重金属相对富集, 该类型土壤的特点为空间分布上与特定地质体伴生, 土壤中重金属含量显著高于区域土壤背景值(如岩溶区), 或土壤中重金属的生物有效性显著高的地区(如黑色岩系分布区)<sup>[5-8]</sup>。已有的研究多针对人为污染<sup>[9-11]</sup>, 对地质成因的污染研究相对较少, 尤其是地质高背景区居民食用农产品实际生态风险效应不清。

岩溶地区碳酸盐岩在风化和成土过程中, 由于钙、镁等成分溶于水而淋失, 不溶的黏土性风化物残

基金项目: 重庆市科学基金委(cstc2018jszx-zdyfxmX0006); 重庆市规划和自然资源局((2019)128-12)

第一作者简介: 余飞(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土壤地球化学、环境地球化学。E-mail: yfcags@126.com。

通信作者: 李瑜(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地质量地球化学调查。E-mail: 395904623@qq.com。

收稿日期: 2020-11-28

留下来,大部分微量元素在此过程中相对浓缩,造成其形成的土壤中微量元素显著富集<sup>[12]</sup>。土壤中的重金属元素并不是全部都能被作物吸收利用,作物对重金属的吸收程度即为元素的生物有效性<sup>[13]</sup>,岩溶区作为一种特殊的地质高背景区,其土壤异常富集重金属而生物有效性却不高的现象已被报道。牙买加岩溶区土壤中含As、Cd、Cr等重金属元素,但是当地水稻籽实中As和Cr含量平均水平均在 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下<sup>[14-15]</sup>;中国广西岩溶发育区土壤Cd、As、Pb等重金属元素含量高,但水稻籽实中Pb不超标,无机As、Cr和Hg的超标率仅有1%左右,Cd超标率为12.5%,显著低于非岩溶区水稻Cd的超标率<sup>[16]</sup>。土壤重金属超标并不意味着农作物重金属超标,同一岩溶地质高背景区的小流域中,冲积物发育的土壤中明显含有更多的活性态镉,而残积物发育的土壤,即使镉总量可能比较高,但活性态占比却很小,况且残积物发育土壤镉总量也有差异<sup>[17]</sup>。可见重金属元

素在岩溶区土壤—农作物系统中的迁移过程影响因素复杂<sup>[18]</sup>。

本次研究区位于重庆市南川区,区内广泛发育岩溶地貌,岩溶区土壤重金属具有天然的高背景属性。同时,南川区属于长江流域水稻优势区,云贵高原夏秋蔬菜生产优势区域,长江中上游特色和出口绿茶重点区域,是重庆市首批国家级现代农业示范区。开展区域岩溶区土壤—农作物系统重金属含量及富集状况调查,探讨土壤重金属元素富集及其生物有效性的影响因素具有重要意义,为岩溶地质高背景区农用地土壤环境质量分级、污染风险管控和土地安全区划提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市南部(图1),是渝南黔北的重

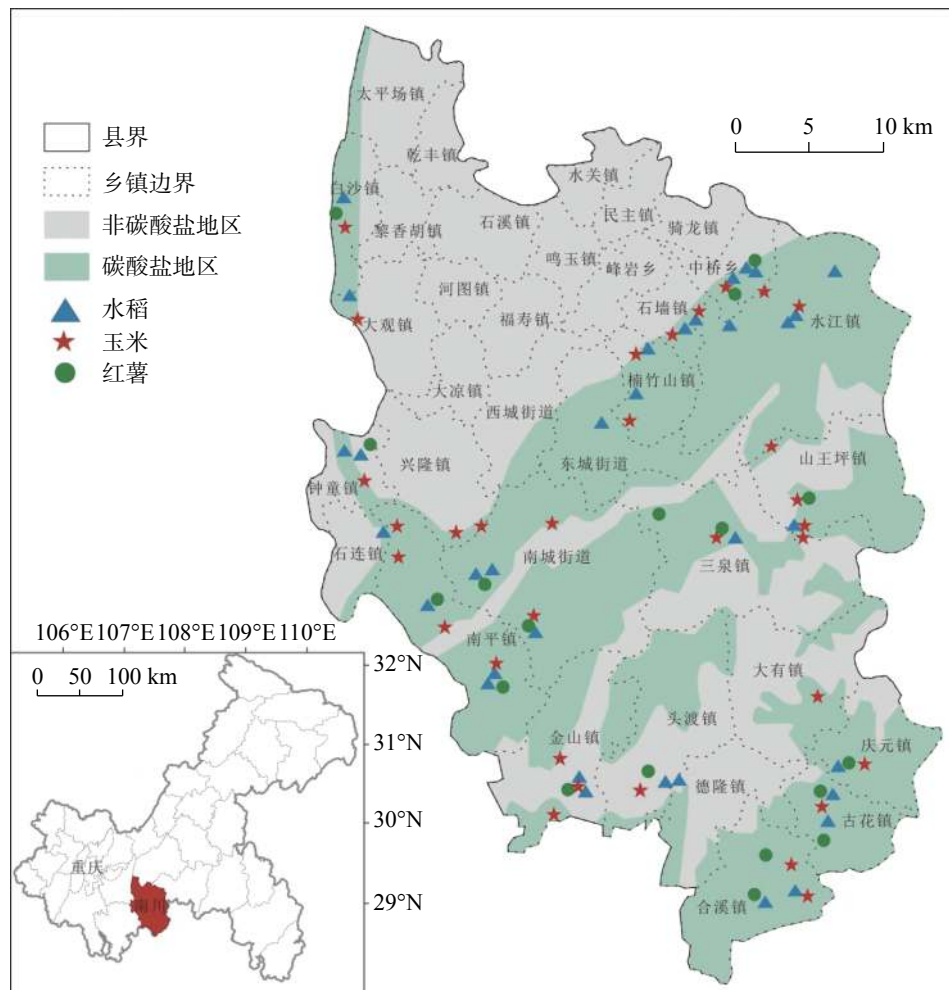


图1 研究区采样点位分布示意图

Fig. 1 Locations of sampling sites in the study area

要门户,地理坐标介于东经 106°54'~107°27',北纬 28°46'~29°30'之间。研究区属亚热带湿润季风气候,年均温 16.6 ℃,年降雨量 1 185 mm,年日照时数 1 273 h,无霜期 308 d,相对湿度 80%。南川区土地利用特点表现为农用地比重大,林地与耕地是全区主要的用地类型,分别占 54.52% 和 22.34%。全区土地利用空间分布差异显著:耕地主要分布在区境北部;林地主要分布在区境南部。水稻、玉米和红薯是区内主栽大宗农作物,耕作制度,旱地以玉—薯两熟为主,水田则推广稻—菜栽培模式。研究区内岩溶地区主要分布在寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系,其中寒武系、奥陶系和二叠系以灰岩、白云岩、页岩、粉砂岩出露为主,主要发育的土壤为黄壤和黄棕壤;三叠系主要为灰岩出露,土壤较贫瘠,以石灰土为主<sup>[19]</sup>。

## 1.2 样品采集与分析测试

以研究区 1:5 万地质图、土地利用现状图、土壤类型图等为底图,在岩溶区的耕地进行样点布设,样点的布设遵循“随机”和“等量”的原则,布点尽量远离村庄、道路和工矿企业等人为影响区域。在实际采样中,根据预设的采样点进行野外采样,考虑到土地利用的变化和地形因素,采样点可在附近 1 km 内进行调整,共采集本研究区大宗农作物水稻 34 件,

玉米 32 件,红薯 18 件,并在农作物样品同点位采集耕层土样品 84 件。样品采集方法参照《DZ/T0295-2016 土地质量地球化学评价规范》<sup>[19]</sup> 执行,每个采样点根据田块特点采用星形法、蛇形法等方法,进行多植株混合采样,多株农作物耕层土充分混合均匀后,四分法留取 1.5~2 kg 装入样品袋。采样过程中,避免采集肥料、排污物等可能对土壤元素产生叠加的样品。

土壤及农作物样品分析测试由国土资源部重庆矿产资源监督检测中心承担。土壤样品分析 pH、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe(以 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 计)、CaO、K<sub>2</sub>O、MgO、Mn、Se、As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 等 17 项指标,农作物样品测定 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 等 7 项指标。土壤和农作物样品分析测试方法和检出限见表 1 和表 2。样品分析方法和质量控制严格按照《DZ/T0295-2016 土地质量地球化学评价规范》和《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005-03)的有关规定执行。土壤样品采用国家一级标准物质进行准确度和精密度控制,每批样品(50 个号码)中密码插入 4 个国家一级标准物质(土壤)控制精密度,每 500 件插入 12 件国家一级标准物质(土壤)控制准确度,合格率均为 100%。农作物样品中插入国家一级标准物质 4 件与样品一起测定,

表 1 土壤元素分析方法与检出限

Table 1 Element analysis method and detection limit of soil

指标	测定方法	检出限/mg·kg <sup>-1</sup>	指标	测定方法	检出限/mg·kg <sup>-1</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X射线荧光光谱法	0.05	Se	原子荧光光谱法	0.01
CaO	X射线荧光光谱法	0.05	As	原子荧光光谱法	0.2
K <sub>2</sub> O	X射线荧光光谱法	0.05	Hg	原子荧光光谱法	0.000 5
MgO	X射线荧光光谱法	0.05	Mn	等离子体光谱法	10
Na <sub>2</sub> O	X射线荧光光谱法	0.1	Cu	等离子体发射光谱法	1
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X射线荧光光谱法	0.05	Ni	等离子体发射光谱法	1
SiO <sub>2</sub>	X射线荧光光谱法	0.1	Cd	等离子体质谱法	0.02
Cr	X射线荧光光谱法	3	pH	pH计电极法	0.1
Zn	X射线荧光光谱法	1			

表 2 农作物元素分析方法与检出限

Table 2 Element analysis method and detection limit of crop

指标	测定方法	检出限/mg·kg <sup>-1</sup>	指标	测定方法	检出限/mg·kg <sup>-1</sup>
As	等离子体质谱法	0.03	Hg	等离子体质谱法	0.000 5
Cd	等离子体质谱法	0.000 1	Ni	等离子体质谱法	0.2
Cr	等离子体质谱法	0.2	Zn	等离子体光谱法	0.05
Cu	等离子体质谱法	1			

每件样品进行 100% 的重复分析,抽取 5% 的样品进行外检,各类分析相对误差(RE%) $\leq$ 30%,合格率为 100%。

### 1.3 评价方法

元素富集系数(BCF)是农作物样品某元素含量与耕层土中对应元素含量的比值,反映出植物对土壤中元素的吸收富集能力,可用来表征元素的生物有效性<sup>[20]</sup>。其计算公式如下:

$$BCF = C_{\text{农作物}} / C_{\text{耕层土}} \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{农作物}}$  为重金属元素在作物中的含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  $C_{\text{耕层土}}$  为重金属元素在耕层土中的含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

### 1.4 数据处理

本研究采用 IBM SPSS statistics 19 和 Microsoft Office Excel 2010 进行统计分析和数据处理,散点图均采用 Microsoft Office Excel 2010 软件计算和制作,后经过 CorelDRAWX7 软件清绘完成,各元素指标间

的 Pearson 相关系数利用 IBM SPSS statistics 19 软件处理和计算得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属元素含量特征

研究区不同农作物耕层土壤重金属含量特征见表 3。由表可知,水稻、玉米和红薯耕层土壤中 Zn 和 Cr 含量较高,其次为 Cu 和 Ni, As、Cd 和 Hg 含量较低,但均高于重庆市表层土壤背景值<sup>[21]</sup>和中国表层土壤背景值<sup>[22]</sup>,显示出岩溶区表层土壤重金属元素富集的基本特征。研究区土壤 pH 在 4.51~9.20 之间,平均值为 7.06,整体处于中—碱性水平(pH>6.5 占 66.37%)。研究区位于西南山区,地势差异较大,可能受基岩风化过程中重金属的相对富集和地形等因素的影响,土壤重金属的空间变异性以中高度为主(除玉米耕层土 Cd 变异系数小于 0.15,其余农作物耕层土重金属变异系数均大于 0.15)。

表 3 研究区不同农作物耕层土壤重金属含量特征 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
Table 3 Concentrations of heavy metals in the top soil of different crops in the study area ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

耕层土类型	统计值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn	pH
水稻耕层土	最小值	3.33	0.10	52.7	15.8	0.03	17.1	46.5	4.51
	最大值	22.53	2.45	131.8	88.1	0.25	54.4	149.1	8.72
	平均值	9.72	0.54	79.6	34.7	0.11	33.6	96.1	7.03
	变异系数	0.51	0.78	0.23	0.35	0.48	0.27	0.24	0.16
玉米耕层土	最小值	3.47	0.07	61.9	20.1	0.04	13.7	51.9	4.90
	最大值	26.52	3.78	272.0	120.2	0.68	119.5	180.5	9.20
	平均值	11.35	0.52	88.8	38.4	0.12	38.5	101.6	7.18
	变异系数	0.43	0.14	0.33	0.32	0.17	0.32	0.56	0.78
红薯耕层土	最小值	3.13	0.11	41.7	14.7	0.04	13.0	45.5	4.88
	最大值	20.53	1.14	119.9	86.5	0.33	62.7	179.2	8.20
	平均值	11.11	0.48	80.9	35.0	0.12	35.8	98.4	7.16
	变异系数	0.41	0.52	0.27	0.45	0.56	0.34	0.30	0.15
研究区耕层土壤平均值		11.53	0.51	84.83	37.62	0.11	36.62	99.99	7.06
重庆表层土壤背景值 <sup>[14]</sup>		6.62	0.28	74.4	24.6	0.069	31.6	81.9	—
中国表层土壤背景值 <sup>[15]</sup>		9.1	0.15	63	23	0.05	26	67	—
广西岩溶地区平均值 <sup>[17]</sup>		26.3	1.004	147	31	0.185	38	130	—
重庆黑色岩系区平均值 <sup>[18]</sup>		—	9.16	344	33.2	—	93.9	193	—

广西是中国岩溶发育最强烈的地区,与杨琼等<sup>[16]</sup>对广西岩溶地区土壤重金属研究相比,本次研究区土壤 As、Cd 和 Cr 含量明显低于广西(分别是研究区耕层土壤的 2.28、1.99 和 1.73 倍),其余重金属

元素含量相差不大(表 3)。碳酸盐岩母质发育的土壤中 Cd、As 和 Cr 等重金属含量高与碳酸盐岩成土过程中重金属的次生富集相关,土壤成熟度越高,土壤中重金属富集越显著<sup>[23]</sup>。因此,研究区与广西岩

溶区同一重金属含量存在较大的差异,可能与不同地区碳酸盐岩成土过程中风化程度和环境条件等不同有关。

与刘意章等<sup>[8]</sup>对重庆巫山黑色岩系区土壤重金属含量研究结果相比,重庆南川岩溶地质高背景区耕层土壤 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 平均含量分别是黑色岩系的 0.055、0.25、1.13、0.39 和 0.52 倍(表 3)。可见不同的土壤母质由于物质组成的不同,发育的土壤中重金属含量差异较大。

根据《土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中规定的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 风险筛选值,研究区耕层土壤重金属元素含量大于筛选值的样本占总样本的比例由大到小依次为 Cd(41.59%)>Cu(5.31%)>As(3.54%)>Ni(1.77%)>Cr(0.89%)=Hg(0.89%)>Zn(0%),说明研究区耕层土壤中 Cd 存在一定的污染风险。

## 2.2 农作物重金属元素含量特征

研究区不同农作物重金属含量特征见表 4 和图 2。

研究区农作物水稻中重金属含量由高至低依次为 Zn>Cu>Ni>As>Cr>Cd>Hg; 玉米中重金属含量由高至低依次为 Zn>Cu>Ni>Cr>As>Cd>Hg; 红薯中重金属含量由高至低依次为 Zn>Cu>Ni>Cr>As>Cd>Hg, 水稻、玉米和红薯中 Zn 的含量都是最大,其次为 Cu、Ni,而 Hg 含量最低。水稻中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 的平均值分别为 0.13、0.05、0.12、2.30、0.005、0.24、21.1 mg·kg<sup>-1</sup>; 玉米中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 的平均值分别为 0.04、0.06、0.11、2.67、0.002、0.25、25.4 mg·kg<sup>-1</sup>; 红薯中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 的平均值分别为 0.09、0.04、0.27、7.93、0.002、0.59、10.8 mg·kg<sup>-1</sup>。

在所采集的所有农作物样品中,除 Cd 以外,其余农作物重金属元素含量均未超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中的标准限值(表 4),而水稻、玉米和红薯中 Cd 超标率分别为 5.89%、6.25% 和 5.56%。相关性分析统计结果显示,研究区农作物中重金属含量与耕层土壤中重金属含量均无显著相关关系,说明岩溶地质高背景区

表 4 研究区不同农作物重金属含量特征 (mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Concentrations of heavy metals in different crops in the study area(mg·kg<sup>-1</sup>)

农作物	元素	极小值	极大值	均值	标准差	富集系数	GB 2762-2017	超标率/%
水稻	As	0.05	0.26	0.13	0.05	0.015	0.5	0
	Cd	0.01	0.27	0.05	0.06	0.157	0.2	5.88
	Cr	0.10	0.14	0.12	0.01	0.002	1	0
	Cu	0.60	4.57	2.30	0.91	0.071	—	—
	Hg	0.002	0.008	0.005	0.002	0.051	0.02	0
	Ni	0.09	1.40	0.24	0.24	0.008	—	—
	Zn	16.0	31.9	21.1	3.64	0.234	—	—
玉米	As	0.03	0.07	0.04	0.01	0.004	0.5	0
	Cd	0.002	0.30	0.04	0.06	0.125	0.1	6.25
	Cr	0.09	0.14	0.11	0.01	0.001	1	0
	Cu	1.47	10.09	2.67	1.55	0.080	—	—
	Hg	0.001	0.005	0.002	0.001	0.023	0.02	0
	Ni	0.12	1.05	0.25	0.18	0.007	—	—
	Zn	15.0	43.5	25.4	6.13	0.270	—	—
红薯	As	0.04	0.13	0.09	0.02	0.010	0.5	0
	Cd	0.01	0.10	0.04	0.02	0.102	0.1	5.56
	Cr	0.23	0.41	0.27	0.04	0.004	0.5	0
	Cu	4.51	11.99	7.93	2.00	0.255	—	—
	Hg	0.001	0.004	0.002	0.001	0.026	0.01	0
	Ni	0.29	1.71	0.59	0.40	0.019	—	—
	Zn	7.65	14.6	10.8	2.08	0.120	—	—

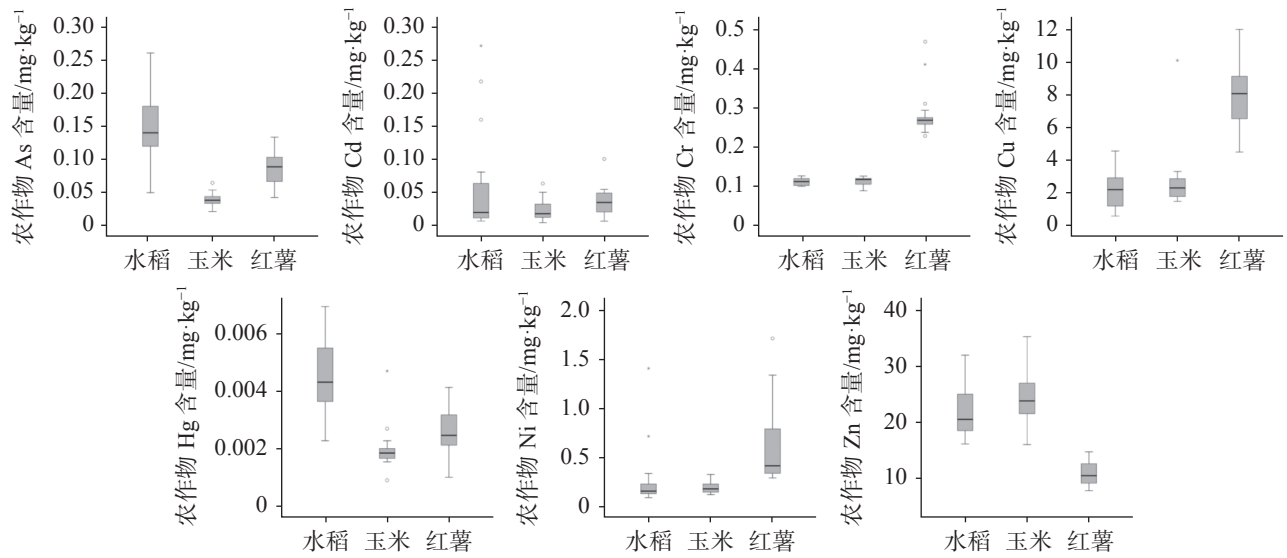


图2 研究区农作物重金属分布箱式图

Fig. 2 Box-plots of heavy metal concentrations in the study area

土壤中重金属含量虽然总量高,但生物有效性较低<sup>[5]</sup>,主要是因为重金属元素可溶部分在碳酸盐岩风化过程中淋失,而非活动态残留在酸不溶物中,造成农作物籽实中重金属含量不高<sup>[13]</sup>。综合重金属含量、重金属超标种类和超标率等指标可知,研究区农作物受Cd污染的风险最高,这与Cd的较高迁移能力有关<sup>[24]</sup>。

### 2.3 农作物重金属元素富集特征

如图3所示,水稻中重金属元素富集系数大小顺序为Cd>Zn>Cu>Hg>As>Ni>Cr;玉米中重金属元素富集系数大小顺序为Zn>Cd>Cu>Hg>Ni>As>Cr;红薯中重金属元素富集系数大小顺序为Cu>Zn>Cd>Hg>Ni>As>Cr。Cd、Zn和Cu在水稻、玉米和红薯中的富集系数最高,Cd平均富集系数均大于0.1,在水稻中平均富集系数最大达0.157,可能是研究区以岩溶地貌为主,地质背景相对较高,土壤中的Cd主要以易于迁移的碳酸盐结合态存在,Cd<sup>2+</sup>通过Fe<sup>2+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Zn<sup>2+</sup>等二价离子转运易于被作物吸收<sup>[24-26]</sup>;Zn、Cu是农作物生长所必需的营养元素,农作物对其有一定的需求量,故Zn、Cu在农作物中吸收能力较强<sup>[27]</sup>。相比之下,As、Cr、Hg、Ni的富集系数相对较小,这主要是由于根系会阻碍农作物吸收As、Cr、Hg、Ni等元素<sup>[13,28]</sup>。

### 2.4 土壤重金属元素的富集影响因素

为了研究岩溶区土壤重金属元素富集的影响因

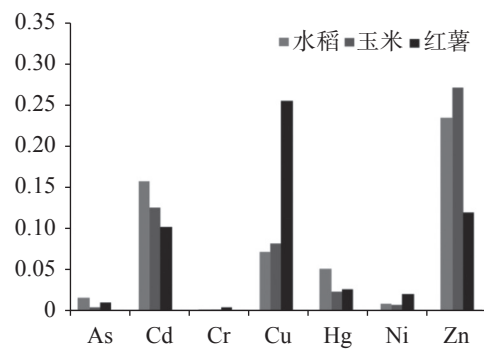


图3 研究区不同农作物重金属富集系数

Fig. 3 Enrichment factors of heavy metals in different crops of the study area

素,计算了研究区土壤中pH、各氧化物、TOC、Mn含量与重金属元素As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn含量之间的Pearson相关系数,结果见表5。

从表5可见,研究区土壤重金属与SiO<sub>2</sub>主要表现出显著负相关(As为负相关),与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主要呈显著正相关(As和Hg为正相关),表明土壤As、Cd、Cu等元素含量随SiO<sub>2</sub>含量的增加而减少,随着Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加而增加。研究表明,土壤中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>越低,土壤黏粒含量越高,土壤质地越细<sup>[24,29]</sup>,说明土壤中Cd等重金属元素的富集与土壤黏粒、土壤质地密切相关。

广西岩溶区土壤中含Fe、Mn、Al矿物的大量发育是土壤中As、Cd等重金属元素富集的主要因素<sup>[5]</sup>,研究区土壤As、Ni、Zn等重金属元素与TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Mn呈显著正相关,说明土壤中As、Ni、Zn等重金属受

表 5 研究区土壤重金属与 pH、氧化物含量的 Pearson 相关系数表 (n=113)

Table 5 Pearson correlation of soil heavy metals with pH and oxide contents in the study area (n=113)

元素	pH	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Mn	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Se
As	0.135	-0.285**	-0.087	0.175	-0.127	-0.209*	-0.070	0.290**	0.382**	0.191*
Cd	0.162	-0.066	0.086	0.190*	-0.305**	-0.117	0.117	0.006	0.296**	0.396**
Cr	0.219*	-0.092	0.140	0.478**	-0.427**	-0.148	-0.016	0.123	0.671**	0.320**
Cu	0.056	-0.055	0.024	0.224*	-0.391**	-0.158	0.030	0.065	0.743**	0.509**
Hg	0.142	-0.189*	-0.039	0.159	-0.243**	-0.297**	0.121	0.052	0.245**	0.311**
Ni	0.128	0.055	0.012	0.602**	-0.503**	0.078	-0.021	0.240*	0.775**	0.289**
Zn	0.158	0.116	-0.061	0.499**	-0.494**	0.258**	-0.021	0.303**	0.756**	0.426**

\*\*: $P<0.01$ , 在0.01水平上显著相关; \*:  $P<0.05$ , 在0.05水平上显著相关。

铁锰氧化物吸附,引起土壤中 As、Ni、Zn 等重金属元素富集<sup>[13]</sup>。

研究区土壤重金属与土壤 pH 均表现为正相关,说明土壤 pH 越大,土壤重金属含量越高。主要是因为土壤 pH 上升,重金属元素生物有效性降低,土壤中重金属元素向农作物的迁移能力降低,导致土壤中残留的重金属元素富集。

## 2.5 土壤-农作物系统Cd 迁移转化的影响因素

研究区农作物受 Cd 污染的风险最高,因此本文重点分析和讨论 Cd 元素在土壤-农作物系统中的迁移转化影响因素。土壤中重金属元素能否被植物

吸收,主要取决于该元素的有效性,而元素生物有效性的影响因素很多,例如土壤环境的 pH、Eh、主量元素(如 Ca、Fe)等<sup>[5,30-31]</sup>。为研究 Cd 在土壤-农作物系统迁移转化的影响因素,计算了研究区土壤中 pH、各氧化物、Mn 含量与农作物 Cd 富集系数之间的 Pearson 相关系数(表 6)。由表 6 可知,除土壤 Na<sub>2</sub>O、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O 与水稻、玉米和红薯 Cd 富集系数未见一致相关性外,土壤 SiO<sub>2</sub> 与水稻、玉米和红薯 Cd 富集系数呈正相关关系,其余指标与水稻、玉米和红薯 Cd 富集系数呈负相关关系,其中土壤 pH 与水稻、红薯 Cd 富集系数相关性系数最大,土壤 SiO<sub>2</sub> 与玉米 Cd 富集系数相关性系数最大。

表 6 研究区 Cd 富集系数与 pH、氧化物含量的 Pearson 相关系数表

Table 6 Pearson correlation of Cd enrichment coefficient with pH and oxide contents in the study area

农作物	pH	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Mn	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Se
水稻	-0.291	0.026	-0.129	0.062	0.264	0.189	-0.236	-0.258	-0.097	-0.307
玉米	-0.111	-0.138	0.001	-0.139	0.284	-0.039	-0.192	-0.174	-0.153	-0.201
红薯	-0.653**	0.008	-0.280	-0.398	0.659**	-0.320	-0.306	-0.553*	-0.209	-0.455

\*\*: $P<0.01$ , 在0.01水平上显著相关; \*:  $P<0.05$ , 在0.05水平上显著相关。

土壤 pH 是影响 Cd 元素迁移转化的重要因素,在酸性条件下,土壤溶液中 Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>和 H<sup>+</sup>等阳离子含量增加,加剧了 Cd 元素在土壤中交换位的竞争,使得土壤对 Cd 元素的吸附减少,增加了 Cd 元素的有效性;而在中性和碱性条件下,Cd 氢氧化物、硫化物、磷酸盐和碳酸盐的沉淀反应所起的作用逐渐增大,有机质和土壤表面胶体对 Cd 的吸附增加<sup>[24]</sup>。随着土壤 pH 的增高,土壤胶体负电荷增加,H<sup>+</sup>的竞争能力减弱,使 Cd 被结合得更牢固,多以难溶的氢氧化物或碳酸盐及磷酸盐的形式存在,土壤中的有效态 Cd 向无效(缓效)态 Cd 转化,从而降低 Cd 的有效性,作物对 Cd 的吸收也降低<sup>[32-33]</sup>。研究区土壤重

金属含量较高,但整体处于中-碱性水平(pH>6.5 占 66.37%),重金属的生物有效性较低,如图 4 所示,研究区大宗农作物 Cd 富集系数大于 0.2,主要集中在 pH<7 的范围,尤其是水稻。

土壤中 SiO<sub>2</sub> 含量越高,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 等组分含量越低,土壤质地越偏向于砂质和粉砂质,对 Cd 的吸附能力越弱,Cd 的生物有效性越强<sup>[34-35]</sup>。如图 5 所示,当 SiO<sub>2</sub> 含量小于 60% 时,Cd 的富集系数缓慢增加;当 SiO<sub>2</sub> 含量大于 60% 时,随着土壤 SiO<sub>2</sub> 含量的增加,Cd 的富集系数迅速增大。

研究区土壤 CaO 含量与农作物 Cd 富集系数相关关系(图 6 a、b、c),农作物 Cd 富集系数较大的样

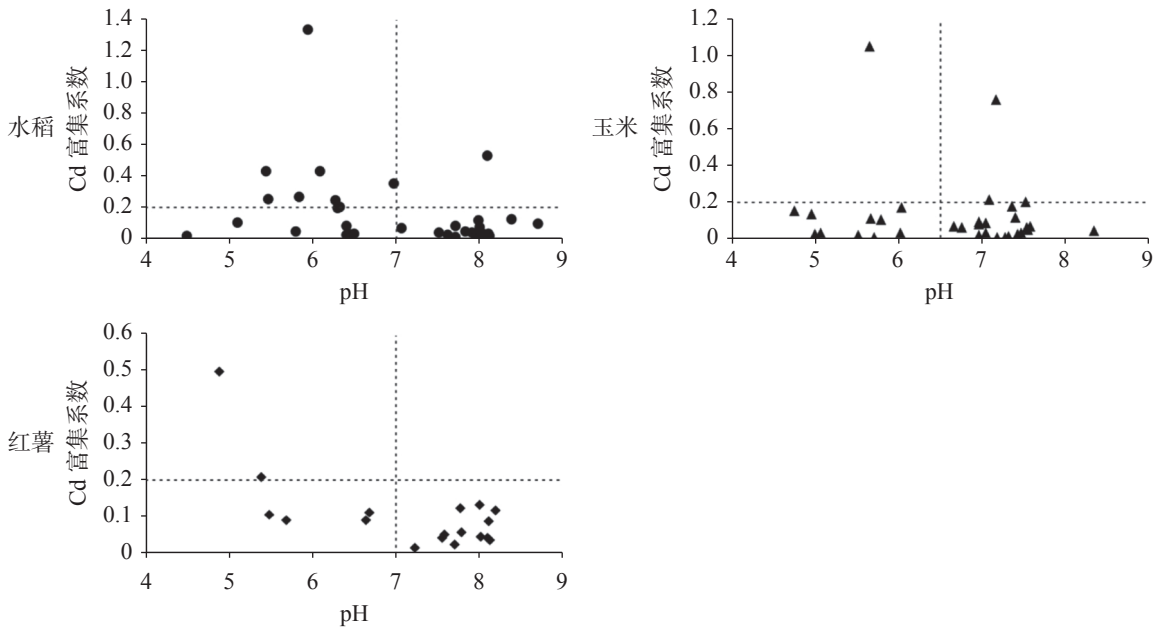


图4 研究区土壤 pH 与 Cd 富集系数相关关系  
 Fig. 4 Correlation of soil pH with Cd enrichment factors

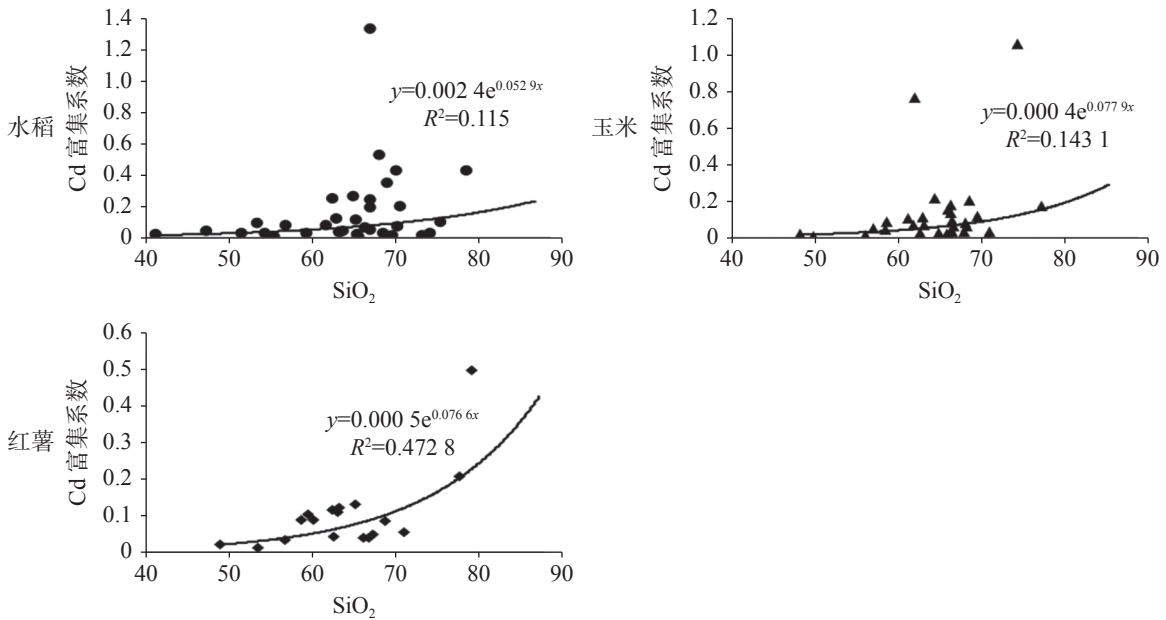


图5 研究区土壤 pH 与 Cd 富集系数散点图  
 Fig. 5 Scatter diagram between soil pH and Cd enrichment factors

品主要集中在土壤 CaO 含量小于 2.0% 的范围,表明土壤中 CaO 含量对农作物富集系数具有一定的边界影响效应。如图 6 d、e、f 所示,由于土壤中  $Ca^{2+}$  是缓冲土壤酸化的主要阳离子,当土壤 CaO 含量大于 1% 时,土壤 pH 多数大于 8,即当岩溶地质高背景区土壤 CaO 和 pH 较高时,即使土壤 Cd 含量普遍很高,但 Cd 生物有效性偏低,这与 Wen 等<sup>[5-6]</sup>、杨琼等<sup>[16]</sup>、李杰等<sup>[17,23]</sup> 对广西岩溶地质高背景区的研究结果基

本一致。研究区 Cd 富集系数与 Mn、 $TFe_2O_3$  呈负相关关系,主要是由于碳酸盐岩在风化成壤过程中,重金属被不断吸附或扩散到所形成的 Fe、Mn 氧化物等稳定的新生矿物晶格中<sup>[13,36]</sup>。

土壤 Se 含量与农作物 Cd 富集系数呈负相关关系(表 6),说明 Se 元素对 Cd 等重金属元素具有一定的拮抗作用。一方面,Se 元素会竞争 Cd 元素在植物根系上的吸附位置,从而减少植物对 Cd 的吸收;另



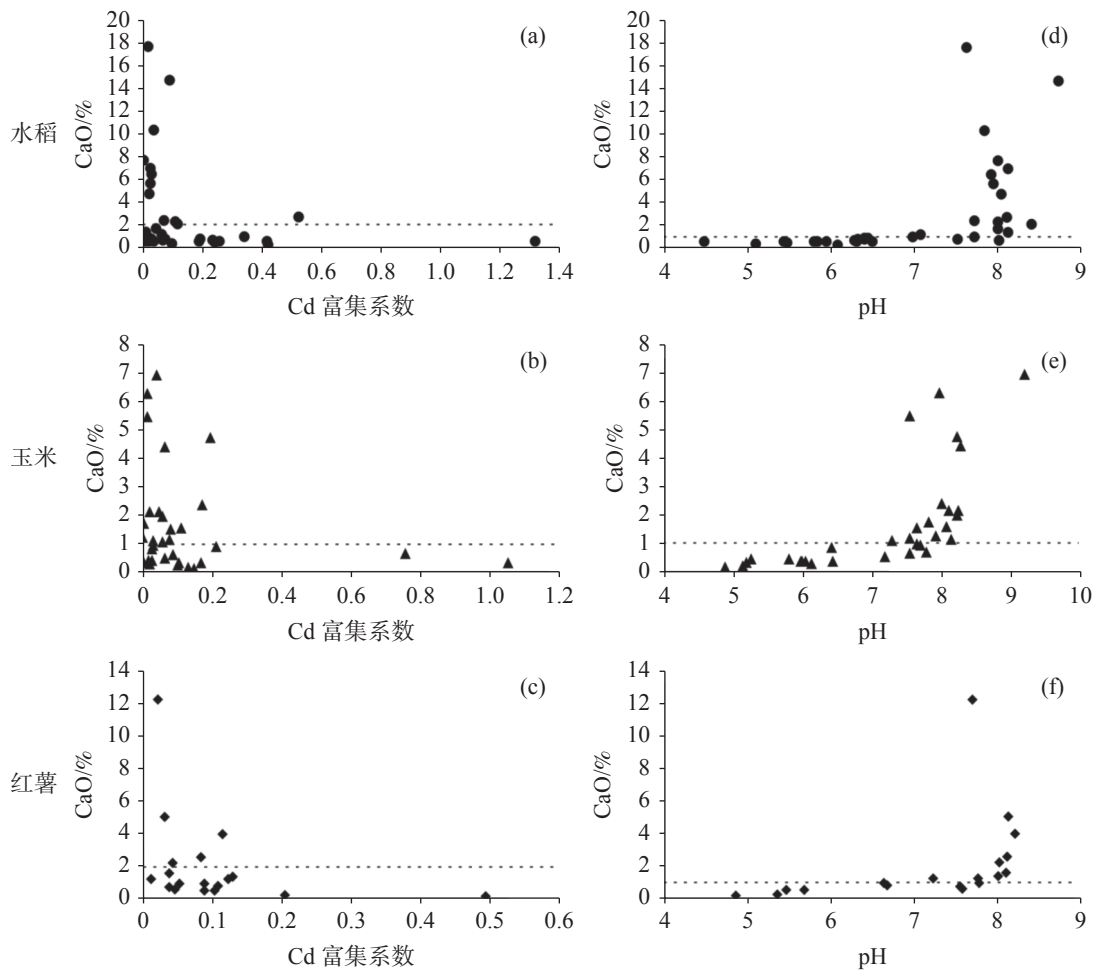


图 6 研究区土壤 CaO 与 Cd 富集系数、土壤 pH 相关关系

Fig. 6 Correlation of soil CaO with Cd enrichment factor and soil pH

一方面,在植物体内,Se 元素会和 Cd 元素发生反应,形成 Cd 的 Se 化物,减少重金属元素的毒害作用<sup>[37]</sup>。此外,已有研究表明,豇豆、黄瓜和番茄等蔬菜类作物,李子和猕猴桃等水果类作物对 Cd 的富集能力较弱<sup>[24,38]</sup>,建议在岩溶地质高背景区种植上述 Cd 低累积作物,用以改善农作物 Cd 污染问题。

### 3 结 论

(1)岩溶地质高背景耕层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 含量均高于重庆和全国表层土壤背景值,Cd 元素富集现象较为突出,有 41.59% 的样品超过国家农用地土壤污染风险筛选值,其余元素超标率在 6% 以下;

(2)与食品安全国家标准相比,水稻、玉米和红薯中仅 Cd 超标,超标率分别为 5.89%、6.25% 和 5.56%;其余重金属元素均未超标,说明岩溶地质高

背景区土壤中重金属含量虽然总量高,但生物有效性较低;

(3)在土壤—农作物系统中,重金属元素迁移累积特征差异明显,研究区 Cd、Zn 和 Cu 在土壤—水稻等大宗农作物中的迁移能力明显大于 As、Cr、Hg、Ni;

(4)研究区土壤—农作物系统中,土壤中 CaO 含量增加,土壤碱性越大,Cd 从土壤向农作物的迁移受到抑制;土壤中 SiO<sub>2</sub> 含量越高,土壤质地越偏向砂质和粉砂质,Cd 的吸附能力越弱;土壤铁锰氧化物越多,Cd 越多的进入铁锰氧化物矿物晶格或被这些矿物吸附。

### 参考文献

- [1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,李小飞,张晓霞.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- CHEN Nengchang, ZHENG Yuj, HE Xiaofeng, LI Xiaofei,

- ZHANG Xiaoxia. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [ 2 ] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 1-11.  
ZHAO Fangjie, XIE Wanying, WANG Peng. Soil and human health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 1-11.
- [ 3 ] 张广映, 吴琳娜, 欧阳坤长, 吴攀. 都柳江上游沿岸喀斯特地区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 495-503.  
ZHANG Guangying, WU Linna, OUYANG Kunchang, WU Pan. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soils along the upper reaches of the Dulu river[J]. *Carsoologica Sinica*, 2021, 40(3): 495-503.
- [ 4 ] 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 董金秀, 王佳彬, 余飞. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(2): 941-951.  
WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhongmin, YAN Mingshu, ZHOU Jiao, DONG Jinxiu, WANG Jiabin, YU Fei. Characteristics of cadmium enrichment and pollution evaluation of a soil-crop system in a typical karst area[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 941-951.
- [ 5 ] Yubo Wen, Wei Li, Zhongfang Yang, Qizuan Zhang, Junfeng Ji. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China[J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125620.
- [ 6 ] Cai Limei, Wang Qiushuang, Wen Hanhui, Luo Jie, Wang Shuo. Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: Occurrences and spatial distribution[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168: 184-191.
- [ 7 ] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 刘方, 李颖. 中国南方喀斯特集中分布区土壤Cd污染特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1538-1544.  
LUO Hui, LIU Xiuming, WANG Shijie, LIU Fang, LI Ying. Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1538-1544.
- [ 8 ] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕. 西南高Cd地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2877-2884.  
LIU Yizhang, XIAO Tangfu, XIONG Yan, NING Zengping, SHUANG Yan, LI Hang, MA Liang, CHEN Haiyan. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2877-2884.
- [ 9 ] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(3): 1037-1044.  
LI Yimeng, MA Jianhua, LIU Dexin, SUN Yanli, CHEN Yanfang. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1037-1044.
- [ 10 ] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 4360-4369.  
CHEN Feng, DONG Zeqin, WANG Chengcheng, WEI Xuehua, HU Yu, ZHANG Lijuan. Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4360-4369.
- [ 11 ] 余飞, 张永文, 严明书, 王锐, 张风雷, 钟克强, 朱海山, 罗凯. 重庆汞矿区耕地土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2022, 41(2): 536-548.  
YU Fei, ZHANG Yongwen, YAN Mingshu, WANG Rui, ZHANG Fenglei, ZHONG Keqiang, ZHU Haishan, LUO Kai. Heavy metal pollution and human health risks assessment of soil and crops near the mercury ore in Chongqing[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(2): 536-548.
- [ 12 ] 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峥, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金. 广西典型岩溶区农田土壤-作物系统Cd迁移富集影响因素[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1514-1522.  
MA Honghong, PENG Min, GUO Fei, LIU Fei, TANG Shiqi, YANG Zheng, ZHANG Fugui, ZHOU Yalong, YANG Ke, LI Kuo, LIU Xiujin. Factors affecting translocation and accumulation of cadmium in soil-crop system from a typical karst area in Guangxi Province, China[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1514-1522.
- [ 13 ] 杨阳, 彭叶棉, 王莹, 李芳柏, 刘同旭. 稻田土壤镉的表面络合模型及其生物有效性验证[J]. *科学通报*, 2019, 64(33): 3449-3457.  
YANG Yang, PENG Yemian, WANG Ying, LI Fangbai, LIU Tongxu. Surface complexation model of Cd in paddy soil and its validation with bioavailability[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(33): 3449-3457.
- [ 14 ] Chaosheng Zhang, Gerald Lalor. Multivariate relationships and spatial distribution of geochemical features of soils in Jamaica[J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2003, 14(SI): 57-65.
- [ 15 ] Grant C N, Dennis H T, Antoine J M R, Hoo Fung L A, Lalor G C. Agglomerative hierarchical clustering analysis of twenty-six rice samples analysed by instrumental neutron activation analysis and other techniques[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, 297(2): 233-239.
- [ 16 ] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 刘旭, 卓小雄, 吴天生, 王磊, 韦雪姬, 季峻峰. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统Cd等重金属生态风险评价[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(8): 1317-1331.  
YANG Qiong, YANG Zhongfang, ZHANG Qizuan, LIU Xu, ZHUO Xiaoxiong, WU Tiansheng, WANG Lei, WEI Xueji, JI Junfeng. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical

- background of Guangxi, China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2021, 51(8): 1317-1331.
- [17] 李杰, 战明国, 钟晓宇, 王新宇, 欧阳鑫东, 赵辛金. 广西典型岩溶地区重金属在土壤-农作物系统中累积特征及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(2): 597-606.  
LI Jie, ZHAN Mingguo, ZHONG Xiaoyu, WANG Xinju, OUYANG Xindong, ZHAO Xinjin. Distribution and accumulation of heavy metals in soil-crop systems from a typical carbonate rocks in Guangxi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2): 597-606.
- [18] 唐世琪, 杨峥, 马宏宏, 郭飞, 杨柯, 刘飞, 彭敏, 李括, 刘秀金. 岩溶区土壤镉生物有效性影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1221-1229.  
TANG Shiqi, YANG Zheng, MA Honghong, GUO Fei, YANG Ke, LIU Fei, PENG Min, LI Kuo, LIU Xiujin. Study on factors affecting soil cadmium bioavailability in soil in karst area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1221-1229.
- [19] 余飞, 张风雷, 张永文, 王锐, 王佳彬. 重庆典型农业区土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. *物探与化探*, 2020, 44(4): 830-838.  
YU Fei, ZHANG Fenglei, ZHANG Yongwen, WANG Rui, WANG Jiabin. Geochemical characteristics and influential factors of soil selenium in typical agricultural area, Chongqing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(4): 830-838.
- [20] 姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 杨桦, 张迪, 杨连升, 王贵云. 撒拉溪石漠化治理示范区土壤-作物系统中重金属含量特征[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6): 1256-1267.  
YAO Chengbin, ZHOU Mingzhong, XIONG Kangning, YANG Hua, ZHANG Di, YANG Liansheng, WANG Guiyun. Characteristics analysis of heavy metal content in the soil-crop system in the rocky desertification control demonstration area in Salaxi, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1256-1267.
- [21] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1625-1636.  
BAO Liran, DENG Hai, JIA Zhongmin, LI Yu, DONG Jinxiu, YAN Mingshu, ZHANG Fenglei. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil in northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1625-1636.
- [22] 国家环境保护局. 中国土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.  
State Bureau of Environmental Conservation. Soil environmental background values in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [23] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 43-52.  
LI Jie, ZHU Lixin, KANG Zhiqiang. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of periurban agricultural soils of Nanning, South China[J]. *Carologica Sinica*, 2018, 37(1): 43-52.
- [24] 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜. 重庆市主要农耕地土壤Cd生物有效性及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1864-1870.  
WANG Rui, HU Xiaolan, ZHANG Yongwen, YU Fei, ZHU Haishan, LI Yu. Bioavailability and influencing factors of soil cd in the major farming areas of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1864-1870.
- [25] Li Cheng, Yang Zhongfang, Yu Tao, Hou Qingye, Liu Xu, Wang Jue, Zhang Qizuan, Wu Tiansheng. Study on safe usage of agricultural land in karst and non-karst areas based on soil Cd and prediction of cd in rice: A case study of Heng county, Guangxi[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111505.
- [26] Lina Cao, Chenlu Lin, Yufu Gao, Caiyun Sun, Liang Xu, Liang Zheng, Zhenxing Zhang. Health risk assessment of trace elements exposure through the soil-plant (maize)-human contamination pathway near a petrochemical industry complex, Northeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263(Part A): 114414.
- [27] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 季峻峰, 文字博, 赵万伏. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 18-26.  
TANG Doudou, YUAN Xuyin, WANG Yimin, JI Junfeng, WEN Yubo, ZHAO Wanfu. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 18-26.
- [28] Chen Hongyan, Yuan Xuyin, Li Tianyuan, Hu Sun, Ji Junfeng, Wang Cheng. Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil-crop systems of the industrialization region, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126: 193-201.
- [29] MAKABE Shuhei, KAKUDA Ken-ichi, SASAKI Yuka, ANDO Tadashi, FUJII Hiroshi, ANDO Ho. Relationship between mineral composition or soil texture and available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan[J]. *Soil Science & Plant Nutrition (Wiley-Blackwell)*, 2009, 55(2): 300-308.
- [30] 刘旭, 顾秋蓓, 杨琼, 余涛, 张起钻. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中Cd形态分布特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2017, 31(2): 374-385.  
LIU Xu, GU Qiubei, YANG Qiong, YU Tao, ZHANG Qizuan. Distribution and influencing factors of cadmium geochemical fractions of soils at carbonate covering area in Hengxian and Xiangzhou of Guangxi[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 374-385.
- [31] LI Tianyuan, CHANG Qing, YUAN Xuyin, LI Jizhou, AYOKO Godwin A, FROST Ray L, CHEN Hongyan, ZHANG Xinjian, SONG Yinxian, SONG Wenzhi. Cadmium transfer from contaminated soils to the human body through rice consumption in southern Jiangsu Province, China[J]. *Environmental Science:*

- Processes Impacts, 2017, 19(6): 843-850.
- [32] Mao Changping, Song Yinxian, Chen Lingxiao, Ji Junfeng, Li Jizhou, Yuan Xuyin, Yang Zhongfang, Ayoko Godwin A, Frost Ray L, Theiss Frederick. 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.
- [33] 郭超, 文字博, 杨忠芳, 李伟, 管冬兴, 季峻峰. 典型岩溶地质高背景土壤Cd生物有效性及其控制因素研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, 55(4): 678-687.
- GUO Chao, WEN Yubo, YANG Zhongfang, LI Wei, GUAN Dongxing, JI Junfeng. Factors controlling the bioavailability of soil cadmium in typical karst areas with high geogenic background[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2019, 55(4): 678-687.
- [34] Sebei Abdelaziz, Helali Mohamed Amine, Oueslati Walid, Abdelmalek-Babbou Chiraz, Chaabani Fredj. Bioavailability of Pb, Zn, Cu, Cd, Ni and Cr in the sediments of the Tessa River: A mining area in the North-West Tunisia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 137: 1-8.
- [35] Han Lanfang, Zhao Xingjuan, Jin Jie, Gao Bo, Yang Yan, Sun Ke, Li Fangbai. Using sequential extraction and DGT techniques to assess the efficacy of plant-and manure-derived hydrochar and pyrochar for alleviating the bioavailability of Cd in soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 543-550.
- [36] 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷. 川南山区土壤与农作物重金属特征及成因[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2480-2489.
- HAN Wei, WANG Chengwen, PENG Min, WANG Qiaolin, YANG Fan, XU Renting. Characteristics and origins of heavy metals in soil and crops in mountain area of southern Sichuan[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2480-2489.
- [37] 王锐, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 马宏宏. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(7): 1647-1654.
- WANG Rui, YU Tao, YANG Zhongfang, HOU Qingye, ZENG Qingliang, MA Honghong. Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(7): 1647-1654.
- [38] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃. 不同作物对土壤中Cd的富集特征及低累积品种筛选[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4647-4653.
- CHEN Xiaohua, SHEN Genxiang, BAI Yujie, GUO Chunxia, QIAN Xiaoyong, GU Hairong, HU Shuangqing, ZHAO Qingjie, WANG Zhenqi, FU Kan. Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4647-4653.

## Characteristics and influencing factors of heavy metal accumulation in soil-crop system in the karst area with high geological background of Chongqing

YU Fei, LUO Kai, WANG Jiabin, LI Yu, ZHOU Jiao, WANG Rui, YU Yawei, ZHANG Yunyi

(Chongqing Key Laboratory of Geological Survey For Land Quality, Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China)

**Abstract** Heavy metal pollution in agricultural soil has been attracted worldwide attention for its negative effects on food safety and soil environmental quality, particularly in developing countries, e.g., China. Numerous studies investigated concentrations of heavy metals in soil in relation to different factors, such as high geological background, agricultural activities, industrial activities, mining and transportation. Generally, two different sources of heavy metal accumulated in soil have been put forward, (i) heavy metals from human activities, such as agricultural production, mining and industrial activities, urban life, and from other pollution, such as sewage irrigation, atmospheric sedimentation and incineration, and landfill of domestic waste, and (ii) heavy metals from geological background primarily due to the high content of heavy metals in the parent material itself, which leads to their accumulation in soils. According to China's *National Survey of Soil Pollution*, the soil in the southwestern area of China has been heavily polluted by heavy metals, especially cadmium (Cd), and the high geological background is an important factor leading to excessive heavy metals in soil. The heavy metals contained in soil is mainly derived from the primary minerals of rock. In Southwest China, karst areas are widely distributed where trace elements are rich in soil, hence presenting typical characteristics of high geochemical background. Therefore, soil ecological risk has gradually attracted extensive attention. Heavy metals migrate into soil in various forms and then are transported through the food chain, threatening food safety and human health. In order to investigate the effects of heavy metals in soil-crop systems in the karst areas with high geological background of Chongqing, 84 sets of major crops (rice, corn and sweet potato) and the top soil were collected from the south of Chongqing, and the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni and Zn

and physical and chemical properties of soil were analyzed and determined. Accumulation characteristics and influencing factors of heavy metals in soil and crops were analyzed and determined by geostatistics, bioenrichment factor and pearson correlation coefficient analysis.

Results show that the average values of heavy metals in the top soil of karst area, which present different degree of accumulation, are higher than those of top soil in Chongqing and China. Concentrations of Cd significantly exceed the risk screening values for soil contamination of agricultural land, with the over-standard rate of 41.59%. According to *Chinese Food Safety Standard* (GB 2762-2017), the contents of As, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn in crop samples do not exceed the national food safety standards, and the exceeding rates of Cd in rice, maize and sweet potato are 5.89%, 6.25% and 5.56%, respectively. Meanwhile, the bioenrichment factors of heavy metals in soil-crop system are all smaller than 1, which does not indicate obvious enrichment. This result illustrates that despite high levels of heavy metal elements in the surface soil in the high geological background of karst area, the levels of bioavailable heavy metals that can be absorbed and utilized by crop are low. The pearson correlation coefficient analysis shows that the accumulation of heavy metals in the soil-crop system is mainly affected by soil pH, soil texture and soil Fe and Mn oxides. The migration of heavy metals from soil to crops is inhibited by higher pH, lower SiO<sub>2</sub> content and more iron and manganese oxides in soil.

**Key words** karst areas with high geological background, soil-crop systems, heavy metal, bioavailability

(编辑 杨杨张玲)

---

## 《袁道先文集》出版发行

近日,蒋忠诚研究员主编的《袁道先文集》(上、下册)正式出版发行。

中国科学院院士袁道先先生是我国著名地质学家、水文地质学家、岩溶学家,是我国岩溶地质领域第一位院士,从 1952 年开始从事地质工作,辗转于我国东西南北岩溶山区,至今已有 70 周年,2022 年荣获国际水文地质学家协会岩溶委员会“50 年终身成就奖”。为祝贺袁道先先生从事地质事业 70 周年和袁道先先生 90 寿辰,特编制出版此文集。

文集分为图集和正文。图集共 60 版,包括袁道先先生出生、求学和科研道路相关照片 100 多张。正文分为四个部分,第一部分为学术文选,从袁道先先生近 400 篇论文中选取 88 篇作为代表作;第二部分为地质足迹报刊记录,记载了袁道先先生在报刊

杂志上发表的文章和报刊杂志对袁先生的采访报道;第三部分为著述目录,包含了袁道先先生一生所著专著、学术论文等;第四部分为袁道先先生生平介绍,包括简历、主要贡献、学术组织与社会任职、获得的荣誉与奖励等。

文集记载了袁道先先生对岩溶地质事业的卓越贡献,为建立岩溶动力学和现代岩溶学基本理论做出的重要贡献,内容涉及岩溶山区石漠化问题、岩溶地下水污染问题、岩溶区地质遗产的保护问题、岩溶碳循环与全球气候变化问题等关系国计民生的重大问题,体现了一代岩溶地质人的责任担当与家国情怀。文集的出版有助于广大岩溶地质工作者深入了解袁道先先生的学术思想,以及岩溶学科发展方向,进一步推动岩溶地质事业发展。