

## ◆特邀栏目◆

典型喀斯特区稻田土壤重金属 Cd、Pb 污染及膳食风险评价<sup>\*</sup>李云路, 崔文刚<sup>\*\*</sup>, 刘绥华, 黄月美, 张宏泽

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550025)

**摘要:**为探究典型喀斯特粮食产区稻田土壤和稻谷重金属(Cd、Pb)的污染现状及膳食摄入风险,本研究选取黔中腹地贵州省息烽县作为研究区,采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法和地累积指数法对该区53组稻田土壤样品的重金属(Cd、Pb)含量进行分析和评价,并利用危险商(HQ)法对研究区稻谷进行膳食摄入风险评价。结果表明:息烽县稻田土壤中重金属含量表现为 $Pb > Cd$ , Pb和Cd的平均含量分别为 $33.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均低于国家农业土壤限制值;单因子污染指数( $P_i$ )的平均值均小于1,说明多数样品点位处于无污染水平;内梅罗综合指数法评价结果显示,息烽县稻田土壤中存在中度重金属综合污染现象;地累积指数法结果显示,息烽县90%以上土壤属于无污染级别,稻田土壤中无显著的重金属累积迹象。稻田土壤和稻谷中Cd、Pb变异系数均处于强变异,稻田土壤中Cd、Pb呈显著正相关关系。膳食评价结果显示,稻谷中Cd、Pb的平均危险商值表现为 $Pb < Cd < 1$ ,不存在摄入风险;针对成人而言,个别点位Cd元素危险商值接近1,具有潜在Cd大米污染风险。总体来说,对于Cd、Pb两种重金属元素而言,息烽县稻田土壤环境质量仍处于轻度污染水平,稻谷中无明显重金属累积现象,无膳食摄入风险。

**关键词:**重金属 喀斯特 危险商法 稻谷 膳食风险评价

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)03-0558-08

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20220720.019

土壤是人类生存和发展的基础,其中耕地土壤环境质量直接影响粮食安全和农产品质量,与人类身体健康和社会发展密切相关。土壤重金属污染会导致生态系统的平衡遭受破坏,使部分农作物不能正常生长发育,导致农业产量削减,农产品质量下降,同时还

会由食物链等途径进入人体内并富集,危害人体健康<sup>[1,2]</sup>。2014年全国土壤调查显示,土壤Cd点位超标率为7.0%,Pb点位超标率为1.5%<sup>[3]</sup>,加强耕地土壤环境质量监管、确保农产品质量安全,一直都是近几年研究的热点。

收稿日期:2021-07-08

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(61540072)资助。

【作者简介】

李云路(1996-),男,在读硕士研究生,主要从事地图学与地理信息系统应用研究,E-mail:2281027490@qq.com。

【\*\*通信作者】

崔文刚(1975-),男,副教授,硕士生导师,主要从事测绘工程研究,E-mail:849028074@qq.com。

【引用本文】

李云路,崔文刚,刘绥华,等.典型喀斯特区稻田土壤重金属Cd、Pb污染及膳食风险评价[J].广西科学,2022,29(3):558-565.

LI Y L, CUI W G, LIU S H, et al. Heavy Metal Cd and Pb Pollution and Dietary Risk Assessment in Paddy Soil of Typical Karst Area [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(3): 558-565.

喀斯特地貌主要分布在我国西南地区, 独特的地理环境造成该区域可利用耕地面积少、土壤贫瘠、分布破碎等<sup>[4]</sup>, 加之喀斯特地貌区为石灰岩母质, 导致土壤中 Cd、Pb 元素背景值含量通常高于其他成土母质发育的土壤<sup>[5]</sup>, 同时众多的地表水、地下河为重金属的迁移扩散提供了有利条件。另外, 为了提高农作物产量, 人们对农药化肥的盲目使用, 也会进一步导致重金属污染的潜在发生。

水稻是世界上众多国家和地区的主要粮食作物, 在生长过程中易从土壤中吸收和积累重金属。水稻的不同部位对重金属元素 Cd、Pb 的富集能力有所差异, 表现为茎鞘>叶片>大米<sup>[6]</sup>。摄入和皮肤接触暴露相比, 膳食摄入是人类暴露于潜在污染物环境中的主要路径, 食用 Cd 污染的大米可能会导致慢性 Cd 中毒极端事件, 如痛痛病等<sup>[7,8]</sup>。Pb 是全世界公认的对人类威胁最大的六大元素之一, 极易通过膳食摄入体内, 对人体健康系统造成损害。

目前, 关于喀斯特地区稻田土壤重金属污染和膳食风险的研究仍然较为缺乏, 2014 年阮玉龙等<sup>[4]</sup>针对喀斯特地区农田重金属污染现状进行综述, 认为贵州省农田重金属污染已相当严重, 其中 Cd 是主要的污染元素。息烽县是贵阳市粮食主产区之一, 同时也是典型的喀斯特地貌区, 对该区域的水稻重金属进行研究, 具有一定的代表性。因此, 本研究有针对性地对息烽县稻田 Cd 和 Pb 含量特征和膳食摄入风险进行探究, 以期为同类型重金属污染和膳食风险评价提供参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

息烽县地处贵州山原丘陵中部, 位于贵阳市北部, 东南接开阳县、修文县, 西北与毕节市黔西市、金沙县相连, 北邻遵义, 地势南高北低, 河流众多, 位于 106°27'29" - 106°53'43"E, 26°57'42" - 27°19'45"N。境内最高点海拔约 1 750 m, 最低点海拔约 609 m。息烽县目前已经开发利用的矿产资源包括煤、磷、硅、石灰岩、地热等, 属于北亚热带和南温带季风气候。县域内碳酸岩广布, 喀斯特地貌可达全县总面积的 90%, 石漠化总体处于中轻度水平, 其中东南地区较西北地区石漠化程度轻。农业以水稻和玉米种植为主, 息烽县总耕地面积约 325 666 830 m<sup>2</sup>, 水田耕地

面积约占全县总耕地面积的 1/5。重金属污染主要分布于矿区周围及主干道两侧, 主要的重金属污染源包括采矿、污水灌溉、大气沉降和化肥农药的使用等。

### 1.2 样品采集与分析

#### 1.2.1 样品采集

在水稻种植区采用划区域随机选取原则, 采集 53 个稻田土壤样品, 土层厚度为 0 - 20 cm (每个土壤样品由 5 个近距离土壤样品混合而成), 将样品依次编号封存。在稻田土壤周围采集适量的水稻样品, 用聚乙烯袋封存并与土壤编号对应, 共计 106 个样品。使用银河 6-GPS 接收机 (南方测绘仪器有限公司) 进行单点定位, 定位存在一定程度的偏移, 但不影响数据的准确性。结合实地调查发现, 部分地区 (青山苗族乡、流长镇、小寨坝镇、养龙司镇) 实行水田旱作, 不符合本次研究要求, 故样品点位布设和采集较为稀疏, 研究区样点分布如图 1 所示。

#### 1.2.2 样品处理与分析

将采集的土壤样品于实验室自然风干, 去除植物根系、碎石等杂质, 研磨过筛后封存备用; 水稻样品则选用较为饱满的稻谷籽粒, 烘干处理, 编号封存。本文参照国家现行土壤环境监测技术规范<sup>[9]</sup>, 采用石墨炉原子吸收分光光度法对土壤样品中 Cd、Pb 的含量进行检测。未去壳的稻谷样品使用硝酸、过氧化氢消解滤膜, 使用电感耦合等离子体-质谱法测定稻谷中 Cd、Pb 的含量。称取 10 g 土壤, 加入 25 mL 氧化钾溶液, 于离心管中振荡 5 min, 静置 3 h, 用 pH 计测定土壤 pH 值。每组样品重复 3 次取平均值作为定值。相关性分析使用 SPSS 26.0 软件, 数据统计处理和计算使用 WPS 表格, 作图使用 ArcGIS 10.2 软件。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 耕地重金属污染评价

(1) 单因子污染指数法。

采用单因子污染指数法对稻田土壤重金属进行评价<sup>[10]</sup>, 单因子污染指数能够反映出稻田土壤受单元素的污染状况。计算公式如下:

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

式中,  $P_i$  指单因子污染指数;  $C_i$  指元素实测值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $S_i$  指元素地区背景值, 贵州省 Cd、Pb 的平均背景值分别为  $0.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $35.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[11]</sup>。单因子污染指数评价标准见表 1。

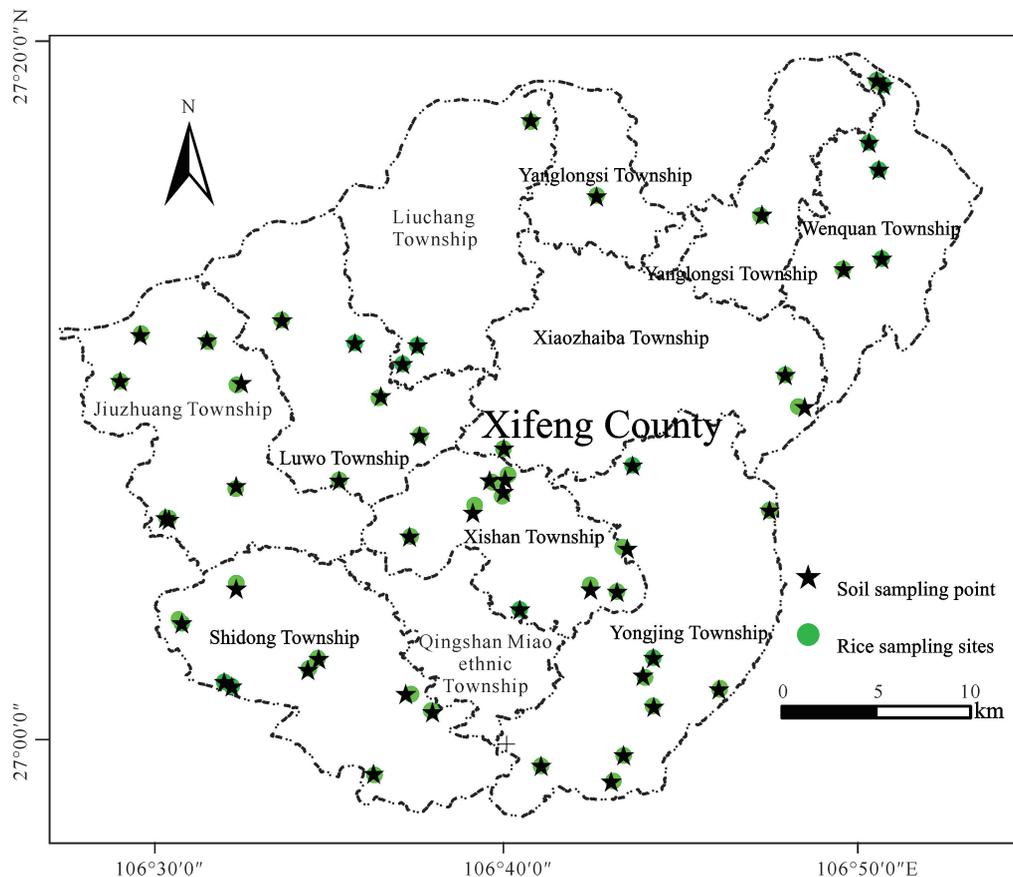


图1 研究区样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in the study area

表1 单因子污染指数评价标准

Table 1 Single factor pollution index evaluation criteria

单因子污染指数( $P_i$ ) Single factor pollution index ( $P_i$ )	污染等级 Pollution level
$P_i \leq 1$	No pollution
$1 < P_i \leq 2$	Light pollution
$2 < P_i \leq 3$	Mild pollution
$3 < P_i \leq 5$	Moderate pollution
$P_i > 5$	Heavy pollution

(2)内梅罗综合指数法。

内梅罗(Nemerow)综合指数法是根据单因子污染指数法计算得出的  $P_i$  最大值和平均值,来评价土壤的综合污染状况,侧重于评价污染较重的重金属元素<sup>[12]</sup>。计算公式如下:

$$P_c = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + P_{i\max}^2}{2}}, \quad (2)$$

式中, $P_c$ 表示土壤受多种重金属共同作用的综合污染指数, $\bar{P}$ 为目标元素中单项指数均值, $P_{i\max}$ 为目标元素中单项指数最大值,综合污染指数分级标准见

表2。

表2 综合污染指数评价标准

Table 2 Comprehensive pollution index evaluation criteria

综合污染指数( $P_c$ ) Comprehensive pollution index ( $P_c$ )	污染等级 Pollution level
$P_c \leq 0.7$	Clean
$0.7 < P_c \leq 1.0$	Still clean
$1.0 < P_c \leq 2.0$	Mild pollution
$2.0 < P_c \leq 3.0$	Moderate pollution
$P_c > 3.0$	Heavy pollution

(3)地累积指数法。

地累积指数( $I_{geo}$ )法不仅考虑到地球化学背景值对重金属污染物的影响,同时兼顾人类活动对重金属污染物的影响<sup>[13]</sup>。计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/kB_i), \quad (3)$$

式中, $C_i$ 表示对应元素的实测值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $B_i$ 表示对应元素的地区自然背景值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $k$ 为消除自然波动纠正系数( $k=1.5$ )<sup>[14]</sup>。参考  $I_{geo}$  值,详细分级见表3。

表 3 地累积指数分级

Table 3 Geoaccumulation index classification

地累积指数( $I_{geo}$ ) Geoaccumulation index ( $I_{geo}$ )	污染等级 Pollution level
$I_{geo} \leq 0$	No pollution
$0 < I_{geo} \leq 1$	Light pollution
$1 < I_{geo} \leq 2$	Mild pollution
$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderate pollution
$3 < I_{geo} \leq 4$	Heavy pollution
$4 < I_{geo} \leq 5$	Very heavy pollution
$I_{geo} > 5$	Foul pollution

### 1.3.2 生物富集系数法

生物富集表示重金属元素从土壤到植物的迁移强度<sup>[15]</sup>。计算公式如下:

$$BCF = P_{i \text{ 稻谷}} / S_{i \pm}, \quad (4)$$

式中, BCF 表示稻谷中重金属的富集程度系数,  $P_{i \text{ 稻谷}}$  表示重金属  $i$  在稻谷中的含量,  $S_{i \pm}$  表示重金属  $i$  元素在土壤中的含量。稻谷对重金属的富集系数可分为 4 个等级:  $BCF > 1.0$ , 表现为强烈富集;  $0.1 < BCF \leq 1.0$ , 表现为中等富集;  $0.01 < BCF \leq 0.1$ , 表现为微弱富集;  $BCF < 0.01$ , 表现为极弱富集<sup>[16,17]</sup>。

### 1.3.3 膳食风险评价

膳食风险评估采用 USEPA 的风险暴露模型, 计算公式如下:

$$EDI = (c \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT), \quad (5)$$

式中, EDI 表示单位体质量人群重金属每日摄入量 ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $c$  表示稻谷重金属含量均值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); IR 表示稻米日均摄入量 ( $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ); EF 表示年平均暴露率 ( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 假设研究对象每天固定食用大米; ED 表示持续暴露时间, ED 取 70(a); BW 表示平均体质量 (kg); AT 表示对象平均暴露时间 (d)。各参数具体取值见表 4<sup>[18,19]</sup>。

对稻米摄入引起的重金属暴露风险, 本研究选择较为普遍的危险商(HQ)法进行评估, 公式如下:

$$HQ = EDI / RfD, \quad (6)$$

式中, RfD 为重金属暴露的参考剂量, Cd 和 Pb 的参考剂量分别为  $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $3.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[20]</sup>。

表 4 风险暴露模型参数

Table 4 Parameters of risk exposure model

暴露人群 Exposed population	暴露评价参数 Exposure evaluation parameters				
	EF ( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ )	ED (a)	BW (kg)	AT (d)	IR ( $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ )
Adult	365	70	70	$70 \times 365$	279.4
Child	365	70	32	$70 \times 365$	65.1

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田土壤和稻谷中重金属含量特征

如表 5 所示, 稻田土壤的 pH 值为 3.91 - 7.99, 平均值为 5.93, 属于偏酸性土壤。稻田土壤中 Cd、Pb 含量分别为 0.15 - 2.28  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 15.89 - 117.00  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均含量分别为 0.42  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 33.74  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均略低于贵州省的背景值。Cd、Pb 的变异系数分别为 78.57% 和 46.71%, 变异系数均高于 36%, 为强变异, 说明研究区稻田土壤中 Cd、Pb 含量受人类活动影响较大, 与敖明等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。超标点位主要分布于矿区周围、主干道沿线两侧和临近城镇区域, 总体表现为东南多、西北少。稻田土壤中两种重金属元素点位超标率大小为 Pb(41.51%) > Cd(13.21%), 说明研究区稻田土壤存在较为明显的 Pb 累积。

表 5 稻田土壤和稻谷中重金属含量分析

Table 5 Analysis of heavy metal content in paddy field soil and rice

统计指标 Statistical index	土壤 pH 值 Soil pH value	稻田土壤 Paddy field soil		稻谷 Rice	
		Cd	Pb	Cd	Pb
Minimum value ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.91	0.15	15.89	0	0
Maximum value ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	7.99	2.28	117.00	0.24	0.09
Average value ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	5.93	0.42	33.74	0.06	0.03
Standard deviation	0.90	0.33	15.76	0.06	0.02
Variable coefficient (%)	15.18	78.57	46.71	100.00	66.67
Point coefficient over standard rate (%)	-	13.21	41.51	3.5	0

Note: "-" indicates no data

稻谷样品中 Cd 含量为 0 - 0.24  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为 0.06  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Pb 含量为 0 - 0.09  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均含量为 0.03  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。稻谷样品中 Cd、

Pb的平均含量均小于国家标准限制值( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[22]</sup>,说明研究区稻谷中Cd、Pb污染程度均较小,稻谷整体质量较高。稻谷中两种重金属的变异系数为Cd(100%)>Pb(66.67%)。

## 2.2 土壤重金属污染评价结果

研究区内稻田土壤单因子评价结果如表6所示。Cd单因子污染指数为0.23–3.51,平均值为0.65;Pb单因子污染指数为0.45–3.32,平均值为0.96。其中,Cd元素无重度、轻度污染点位,中度污染、轻度污染和无污染点位分别占样品总数的1.89%、11.32%和86.79%;Pb无重度、轻度污染点位,中度污染、轻度污染和无污染点位分别占1.89%、39.62%和58.49%。综上可知,针对Cd和Pb两种重金属而言,研究区稻田土壤质量总体偏好,存在少量Cd轻度污染点位,Pb轻度污染点位比例偏高。

研究区稻田土壤内梅罗综合指数为2.55,属于表6 单因子评价结果

Table 6 Single factor evaluation results

重金属元素 Heavy metal elements	$P_i$			样品污染点位个数 Number of sample pollution points				
	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	无污染 No pollution	轻度污染 Light pollution	轻度污染 Mild pollution	中度污染 Moderate pollution	重度污染 Heavy pollution
Cd	3.51	0.23	0.65	46	6	0	1	0
Pb	3.32	0.45	0.96	31	21	0	1	0

## 2.4 稻田土壤及稻谷中重金属相关分析

对息烽县稻田土壤和稻谷中重金属含量进行相关性分析,结果见表7。稻田土壤中Cd和Pb呈极显著正相关关系,说明稻田土壤中Cd、Pb的来源可能相同;稻田土壤和稻谷中Cd、Pb含量呈正相关关系,但相关性不显著,说明其污染程度和来源可能不同,

表7 稻田土壤与稻谷重金属含量相关性分析结果

Table 7 Correlation analysis results of heavy metal content between paddy field soil and rice

	S-Cd	S-Pb	R-Cd	R-Pb
S-Cd	1			
S-Pb	0.74**	1		
R-Cd	0.126	0.121	1	
R-Pb	0.18	0.262	0.317*	1

Note: \*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ), \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ); S indicates paddy field soil, R indicates rice

中度污染水平,说明研究区稻田土壤存在综合重金属污染。地累积指数结果显示,息烽县稻田土壤重金属Cd污染表现为轻度污染、轻度污染、无污染点位,分别占样品总数的1.89%、1.89%和96.22%;Pb污染表现为轻度污染、轻度污染、无污染点位,占比分别为3.77%、1.89%和94.34%。根据超标点位的分布特征,研究区Cd、Pb可能主要来源于采矿、大气沉降等人类活动。

## 2.3 生物富集系数

生物富集系数(BCF)在一定程度上能够反映稻谷对土壤重金属的吸收和富集状况。根据公式(4)可得,息烽县稻谷Cd的生物富集系数为0–0.803,平均值为0.179;Pb的生物富集系数为0–0.0028,平均值为0.00088。Cd表现为微弱富集,Pb为极弱富集。

重金属迁移具有复杂性。稻谷中Cd和Pb含量呈显著正相关关系,说明稻谷中重金属Cd和Pb可能同源。

## 2.5 膳食风险评价

假定稻谷在抛光、清洗和烹饪过程中重金属含量不变,根据稻谷中平均重金属含量和重金属膳食风险评价模型,计算得到不同人群的重金属每日摄入量(EDI)平均值(表8)。从不同人群来看,EDI的平均值成人>儿童;就不同重金属元素EDI平均值而言,Cd>Pb;Cd元素成人和儿童的EDI平均值分别为 $0.241 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.056 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,Pb元素成人和儿童的EDI平均值分别为 $0.111 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.026 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,两种元素的EDI平均值均小于1。稻谷摄入引起的重金属摄入风险结果如表9所示。成人和儿童Cd和Pb的危险商均小于1,无摄入风险,其中成人Cd元素少量点位危险商接近于1。

表 8 不同暴露人群稻谷中重金属每日摄入量

Table 8 Exposure of heavy metals in rice of different exposed population

重金属元素 Heavy metal elements	暴露人群 Exposed population	重金属每日摄入量 ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) Heavy metal EDI ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )			
		最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation
Cd	Adult	0.942	0	0.241	0.255
	Child	0.219	0	0.056	0.059
Pb	Adult	0.378	0	0.111	0.088
	Child	0.088	0	0.026	0.025

表 9 不同暴露人群稻谷中重金属摄入危险商

Table 9 Hazard quotient of heavy metal intake in rice of different exposed population

重金属元素 Heavy metal elements	暴露人群 Exposed population	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation
Cd	Adult	0.942	0	0.241	0.255
	Child	0.219	0	0.056	0.059
Pb	Adult	0.108	0	0.032	0.025
	Child	0.025	0	0.007	0.006

### 3 讨论

选择不同的稻田土壤重金属污染评价方法会导致评价结果存在差异。单因子评价结果显示, 研究区稻田土壤中 Cd、Pb 无污染和轻微污染点个数占样品总数的比值均为 98.11%。内梅罗综合指数法结果显示, 研究区稻田土壤综合污染属于中度污染等级, 在一定程度上受到重金属的综合污染。地累积指数法结果显示, 研究区稻田土壤中 Cd 无污染比例达 96.22%, Pb 无污染比例达 94.34%, 稻田土壤中无明显的土壤重金属累积现象。由于少量稻田土壤点位 Cd 和 Pb 含量较高, 导致内梅罗综合评价结果整体偏高, 因此单因子评价与地累积指数法所得结果更具有参考价值。与阮玉龙等<sup>[4]</sup>的研究对比发现, 息烽县污染等级相比于贵州省 2014 年整体污染等级并无明显加重迹象。虽然喀斯特地区本身的重金属元素背景值较高, 但随着政府的治理体系日益详细化和完整化, 重金属污染已得到一定程度的控制。本研究结果显示, 研究区多数稻田土壤点位 Cd 和 Pb 含量均未超过贵州省背景值, 所有稻谷样品中重金属 Cd

和 Pb 含量均未超过国家食品安全规定的限制值。研究区稻田土壤和稻谷中 Cd 和 Pb 均为强变异, 说明稻田土壤与稻谷中重金属含量受人为影响严重。

结合稻田土壤和稻谷重金属含量的相关性分析结果可知, 稻田土壤中 Cd 和 Pb 呈极显著正相关关系 ( $R^2 = 0.74, P < 0.01$ ), 表明稻田土壤中 Cd 和 Pb 的来源可能相同, 其可能的主要来源包括成土母质、矿场开采、有色金属冶炼、汽车尾气和农药农肥等<sup>[23,24]</sup>。稻谷中 Cd、Pb 含量与稻田土壤重金属 Cd、Pb 含量呈正相关, 但关系不显著, 说明重金属的迁移具有复杂性, 与于灏等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。张慧娟等<sup>[26]</sup>的研究发现, 水稻易从土壤中吸收 Cd、Pb 等元素。范中亮等<sup>[6]</sup>的研究表明, 水稻对重金属 Cd 和 Pb 的吸收能力表现为茎鞘 > 叶片 > 大米, 由于水稻不同部位对重金属 Cd、Pb 的吸收能力存在差异, 但本研究只涉及谷粒, 未对茎鞘和叶片中重金属 Cd、Pb 的含量进行检测, 可能是导致稻田土壤与稻谷中重金属含量关系不显著的原因之一。稻谷中生物富集系数为 Cd > Pb, 表明重金属迁移能力表现为 Cd > Pb, 与丁凌云等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

在膳食摄入风险评价过程中, 由于息烽县稻田土壤中重金属 Cd、Pb 含量较低, 故稻谷中重金属 Cd 和 Pb 含量也较低。在不考虑人体免疫和其他途径摄入的情况下, 息烽县 Cd、Pb 膳食危险商值均小于 1, 其中成人 > 儿童, 主要受稻米日均摄入量和人体质量的影响。

稻田土壤重金属不仅在空间上存在迁移, 而且在时间序列上也存在迁移规律, 本研究仅从土壤-稻米空间上的迁移规律进行刻画, 缺乏对时间规律的探索, 因此在今后的研究中可以筛选出一定数量的典型样品点位进行周期性观测, 获得重金属的年际变化规律, 从而更好地反映重金属的迁移和富集特征。

### 4 结论

本研究结果表明, 息烽县稻田土壤中重金属 Cd、Pb 属于轻微污染等级, 稻田土壤总体质量较好, 污染有较强的变异性; 稻田土壤中重金属 Cd、Pb 安全性总体较好, 但稻田土壤受污染率仍然较高, 且存在少量中度污染点位; 稻谷中 Cd 和 Pb 平均含量均小于国家食品安全规定的限制值, 成人和儿童中 Cd、Pb 元素危险商值均小于 1, 无膳食摄入风险, 其中 Cd 元素个别点位危险商值接近于 1, 说明研究区最大的潜在威胁是 Cd 对大米的污染, 应进一步加强膳食防

备。综上所述,研究区稻田土壤中 Cd、Pb 含量受人为影响程度较大,污染率相对较高,今后应进一步加强人为污染源的控制,以及对稻田土壤进行重点监控与治理,避免其扩散加剧。

#### 参考文献

- [1] HU Y A, CHENG H F, TAO S. The Challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review [J]. *Environment International*, 2016, 92/93: 515-532.
- [2] 王济, 李丁, 宣斌, 等. 有机物料对土壤 Pb 有效态作用机理及影响效果研究进展[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(2): 107-113.
- [3] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [4] 阮玉龙, 连宾, 安艳玲, 等. 喀斯特地区生态环境保护与可持续发展[J]. *地球与环境*, 2013, 41(4): 388-397.
- [5] 方重华, 付舜珍, 何亚琳. 贵州省土壤环境背景值图的编绘研究[J]. *中国环境监测*, 1992(5): 59-60.
- [6] 范中亮, 季辉, 杨菲, 等. 不同土壤类型下杂交水稻地上部器官对重金属镉和铅的富集特征[J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(2): 183-188.
- [7] NOGAWA K, KOBAYASHI E, OKUBO Y, et al. Environmental cadmium exposure, adverse effects and preventive measures in Japan [J]. *Biometals*, 2004, 17(5): 581-587.
- [8] INABA T, KOBAYASHI E, SUWAZONO Y, et al. Estimation of cumulative cadmium intake causing Itai-itai disease [J]. *Toxicology Letters*, 2005, 159: 192-201.
- [9] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166-2004[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [10] CHENG J L, ZHOU S, ZHU Y W, et al. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(1): 50-54.
- [11] 国家环境保护总局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [12] 张又文, 韩建华, 涂棋, 等. 天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(11): 1445-1452.
- [13] 李飞. 城镇土壤重金属污染的层次健康风险评估与量化管理体系[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [14] 李嘉蕊. 基于土壤-作物-人体系统的耕地重金属污染评价和健康风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [15] ZHOU H, YANG W T, ZHOU X, et al. Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(3): 289.
- [16] YANG Y, ZHOU X H, TIE B Q, et al. Comparison of three types of oil crop rotation systems for effective use and remediation of heavy metal contaminated agricultural soil [J]. *Chemosphere*, 2017, 188: 148-156.
- [17] MIDHAT L, OUZZAN N, HEJAJ A, et al. Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169: 150-160.
- [18] ZHANG H D, HUANG B, DONG L L, et al. Accumulation, sources and health risks of trace metals in elevated geochemical background soils used for greenhouse vegetable production in southwestern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137: 233-239.
- [19] 范荣伟. 水稻中重金属复合污染富集特征及风险评价[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- [20] 周涛, 苏小四, 宋铁军, 等. 三江平原典型农作区作物籽粒重金属健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(10): 896-899.
- [21] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 198-205, 324.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] YANG Y G, JIN Z S, BI X Y, et al. Atmospheric deposition-carried Pb, Zn, and Cd from a zinc smelter and their effect on soil microorganisms [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 422-433.
- [24] LEI M, ZHANG Y, KHAN S, et al. Pollution, fractionation, and mobility of Pb, Cd, Cu, and Zn in garden and paddy soils from a Pb/Zn mining area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 168(1): 215-222.
- [25] 于灏, 苏智杰, 祝培甜, 等. 水稻、小麦与土壤中重金属 Cd 含量的关系模拟研究[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 438-445.
- [26] 张慧娟, 王齐, 高媛, 等. 水稻重金属积累分布与风险分析研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(8): 64-72.
- [27] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. *生态环境*,

2006,15(6):1204-1208.

## Heavy Metal Cd and Pb Pollution and Dietary Risk Assessment in Paddy Soil of Typical Karst Area

LI Yunlu, CUI Wengang, LIU Suihua, HUANG Yuemei, ZHANG Hongze

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou, 550025, China)

**Abstract:** In order to explore the pollution status and dietary intake risk of heavy metals (Cd, Pb) in paddy soil and rice in typical karst grain producing areas, Xifeng County in central Guizhou Province was selected as the study area in this study. The contents of heavy metals (Cd, Pb) in 53 groups of samples in the study area were analyzed and evaluated by single factor pollution index method, Nemerow comprehensive index method and geo-accumulation index method, and the dietary intake risk of rice in the study area was evaluated by Hazard Quotient (HQ) method. The results showed that the content of heavy metals in the paddy soil of Xifeng County was  $Pb > Cd$ , and the average contents of Pb and Cd was  $33.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, which was lower than the national agricultural soil limit value. The average value of single factor pollution index ( $P_i$ ) was less than 1, indicating that points of the most samples were at a pollution-free level. The results of Nemerow evaluation showed that there was a moderate comprehensive pollution of heavy metals (Cd, Pb) in the paddy soil of Xifeng County. The results of geo-accumulation index showed that more than 90% of the soil in Xifeng County belonged to non-pollution level, and there was no significant accumulation of heavy metal in paddy soil. The variation coefficients of Cd and Pb in paddy soil and rice were in strong variation, and Cd and Pb in paddy soil were significantly positively correlated. The results of dietary evaluation showed that the average hazard quotient of Cd and Pb in rice was  $Pb < Cd < 1$ , indicating that there was no ingestion risk. For adults, the hazard quotient of Cd element at individual points was close to 1, indicating a potential risk of Cd rice contamination. In general, in terms of Cd and Pb, the soil environmental quality of the paddy fields in Xifeng County is still in a mild pollution level, and there is no obvious accumulation of heavy metals in rice, and there is no risk of dietary intake.

**Key words:** heavy metals; Karst; Hazard Quotient; rice; dietary risk assessment

责任编辑:唐淑芬



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>