

## 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价

刘洋, 刘明庆, 王磊, 尹爱经, 黄忠林, 姚丹丹, 代威, 王宁, 王辉

### 引用本文:

刘洋, 刘明庆, 王磊, 尹爱经, 黄忠林, 姚丹丹, 代威, 王宁, 王辉. 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 785–793.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0839>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 陕西某铅锌冶炼区土壤重金属污染特征与形态分析

刘智峰, 呼世斌, 宋凤敏, 赵佐平, 李琛, 葛红光

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 818–826 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1097>

### 某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价

梁雅雅, 易筱筠, 党志, 王琴, 高双全, 唐婕, 张政芳

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 103–110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0252>

### 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析

宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 李波, 田莉, 王世成

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 487–495 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1222>

### 三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险

王金霞, 罗乐, 陈玉成, 何清明, 詹玲玲

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2711–2717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0844>

### 广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强, 田康, 刘本乐, 张晓辉, 卞子金, 黄标, 袁旭音, 吴龙华, 罗栋源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 987–998 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘洋, 刘明庆, 王磊, 等. 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 785–793.

LIU Y, LIU M Q, WANG L, et al. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil around an abandoned silicon plant in Yunnan[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(4): 785–793.



开放科学 OSID

## 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价

刘洋<sup>1,2</sup>, 刘明庆<sup>3</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 尹爱经<sup>3</sup>, 黄忠林<sup>4</sup>, 姚丹丹<sup>1,2</sup>, 代威<sup>1,2</sup>, 王宁<sup>1,2</sup>, 王辉<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 4. 广西博世科环保科技股份有限公司, 南宁 530000)

**摘要:**为研究云南省某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染状况及评价重金属对土壤环境质量的影响,分析了土壤重金属Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg和As的含量,并采用单项污染指数法、内梅罗综合指数法和土壤综合质量影响指数法对土壤重金属污染状况进行了评价。结果表明:废弃硅厂周边农用地土壤重金属Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg和As的平均值分别为0.39、82.04、33.24、44.85、50.62、109.20、0.12 mg·kg<sup>-1</sup>和34.40 mg·kg<sup>-1</sup>,分别为云南土壤背景值的1.77、1.26、0.72、1.06、1.25、1.22、2.00倍和1.87倍;土壤重金属相关性分析表明,Cd、Zn、Hg、As和Pb呈极显著正相关,可能来自废弃硅厂的煤烟,Cr、Cu和Ni之间呈极显著正相关,并与其余重金属呈显著负相关或不相关,可能来自母质或其他污染源;单项污染指数表明,土壤As存在超标现象,为该地区的主要污染物;内梅罗综合指数表明,靠近硅厂的果园(S1)和稻田(S2)土壤呈轻度污染,远离硅厂的稻田(S3)土壤呈清洁状态;土壤综合质量影响指数表明,靠近硅厂的S1和S2土壤呈亚污染状态,远离硅厂的S3土壤呈清洁状态。研究表明,应该重视该区域农用地的重金属污染问题,并优先开展As污染的修复工作。

**关键词:**土壤重金属;污染评价;综合质量影响指数;废弃硅厂

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)04-0785-09 doi:10.11654/jaes.2021-0839

### Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil around an abandoned silicon plant in Yunnan

LIU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Mingqing<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, YIN Aijing<sup>3</sup>, HUANG Zhonglin<sup>4</sup>, YAO Dandan<sup>1,2</sup>, DAI Wei<sup>1,2</sup>, WANG Ning<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEE, Nanjing 210042, China; 4. Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning 530000, China)

**Abstract:** To study the pollution status of heavy metals in farmland around an abandoned silicon factory in Yunnan Province and evaluate the impact of heavy metals on soil environmental quality, the Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, and As contents of soil were analyzed. Soil heavy metal pollution was evaluated using the single pollution index method, the Nemerow index method, and the influence index of the comprehensive quality method. In soil from the study area, the average values of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, and As were 0.39, 82.04, 33.24, 44.85, 50.62, 109.20, 0.12 mg·kg<sup>-1</sup>, and 34.40 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, which were 1.77, 1.26, 0.72, 1.06, 1.25, 1.22, 2.00 times, and 1.87 times of the corresponding Yunnan soil background value. Correlation analysis of soil heavy metals showed that Cd, Zn, Hg, As, and Pb were positively correlated with each other, which likely originate from the soot of the waste silicon plant. Cr, Cu, and Ni were positively correlated with each other and negatively correlated with or not correlated with other heavy metals. These metals may originate from parent

收稿日期:2021-07-23 录用日期:2021-11-23

作者简介:刘洋(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究。E-mail:liuyang@issas.ac.cn

\*通信作者:王辉 E-mail:hwang@issas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42077034);地方政府委托项目(CN)(Nos.201906,DHHCWF2020028)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China (42077034); Local Government-Commissioned Projects (CN) (Nos. 201906, DHHCWF2020028)

materials or other pollution sources. The single pollution index showed that As in the soil exceeded the standard and was the main pollutant in this area. The Nemerow index showed that the soil of orchards (S1) and paddy fields (S2) near the silicon plant were slightly polluted, while the soil of paddy fields (S3) was far away from the silicon plant was not polluted. Similarly, the influence index of comprehensive quality showed that the soil of S1 and S2 near the silicon plant were in a sub-polluted state, while the S3 far away from the silicon plant were in a clean state. Therefore, attention should be paid to the heavy metal pollution of agricultural land in this region, and priority should be given to the remediation of As pollution.

**Keywords:** heavy metals in soil; pollution assessment; influence index of comprehensive quality; silicon factory

农田土壤环境质量与粮食品质和农业可持续发展息息相关<sup>[1]</sup>。近年来,由矿物资源开发、工厂排放和污水灌溉等人为活动产生的重金属污染严重危害着农田土壤环境质量<sup>[2]</sup>。根据2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》,我国土壤污染严重,其中,无机污染物Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg和As的超标点位占全部超标点位的82.8%,特别是废弃工矿区农田的土壤污染问题最为突出<sup>[3]</sup>。矿业生产活动导致的土壤重金属污染不仅会破坏生态环境,还会通过农产品的富集,沿着食物链最终损害人体健康<sup>[4-5]</sup>。因此,选用合适的评价方法合理地评价农用地土壤重金属污染状况,对农用地土壤环境质量的认知、农作物的安全种植和土壤重金属污染的修复具有重要的科学意义。

近年来,国内外学者对土壤重金属污染的评价方法进行了大量研究<sup>[6-7]</sup>。目前,常用的土壤污染评价方法是利用重金属实测值和土壤背景值或标准值相比较的污染指数法。污染指数法在农田土壤重金属的评价中应用广泛<sup>[8-9]</sup>。其中,单项污染指数法(Single pollution index)以土壤环境标准为基础,能够准确反映某一位点单项重金属污染状况;内梅罗综合指数法(Nemerow index)能够在单项污染指数的基础上,反映多种重金属的综合影响<sup>[10-11]</sup>。土壤和农产品综合质量影响指数法(The influence index of comprehensive quality)从土壤-植物系统的角度出发,兼顾土壤元素背景值、土壤环境质量标准、农产品限量标准及元素的价态效应等因素,是评价土壤重金属复合污染的新方法<sup>[12]</sup>。近年来,综合质量影响指数在不同地区的农田土壤重金属污染评价中得到应用。例如,贺新星等<sup>[13]</sup>利用综合质量影响指数法研究高速公路两侧麦田污染状况的空间分布,发现道路旁土壤和农产品质量主要受交通污染的影响;沈乾杰等<sup>[14]</sup>利用综合质量影响指数法对比废弃铅锌矿区复耕后不同农作物田块的重金属污染特征,为不同作物种植区的合理分配提供了参考。

由于较高的土壤背景值、矿产资源的开发以及高强度的土地利用等原因,云南省土壤存在着重金属污染的风险<sup>[15-17]</sup>,尤其是有关矿厂周边农田土壤污染的报道屡见不鲜<sup>[17-18]</sup>,但硅厂冶炼活动对周边农田土壤重金属污染的研究鲜有报道。硅厂普遍采用碳热还原法制得金属硅<sup>[19]</sup>,其生产过程中会产生大量煤烟,煤烟中各种重金属通过大气沉降在农田中累积<sup>[20-21]</sup>。本研究选取云南某硅厂(2006—2019年持续生产,最高产能为年产20万t金属硅)周边农田土壤,划分3个单元采集耕层土壤样本测定重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg和As)含量,并采用单项污染指数法、内梅罗综合指数法和土壤综合质量影响指数法,分别评价3个单元的复合污染状况,比较不同评价方法的评价效果,以为农田重金属污染的治理提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省西南,属于亚热带季风气候,主导风向为西南风,夏长冬短,干湿分明。年平均降雨量1 654.6 mm,雨热同期,年平均温度19.6℃,蒸发量1 723.6 mm,无霜期315 d左右。研究区地处低纬山原地区,地形为第四纪形成的冲积盆地,四周环山,平均海拔863 m。境内蕴藏着丰富的矿产资源,有色金属有Pb、Zn、Cu、Ni和Cd等。

研究区主要的土壤类型为黄棕壤,土层深厚,质地疏松。土壤pH为7.03~8.30。水稻和水果是当地主要农产品。水稻为单季稻,4月底前后插秧,国庆节前收获;水果主要为百香果和澳洲坚果,8月开始成熟,收获期持续到11月。

### 1.2 样品的采集与分析

#### 1.2.1 样品的采集和制备

在前期初步调查的基础上,对距废弃硅厂1 500 m范围的农田土壤进行取样调查。采样点分布区如图1所示,依照不同农用地类型以及距硅厂远近(下风向),将研究区划分为3个区域:S1、S2和S3。其中,



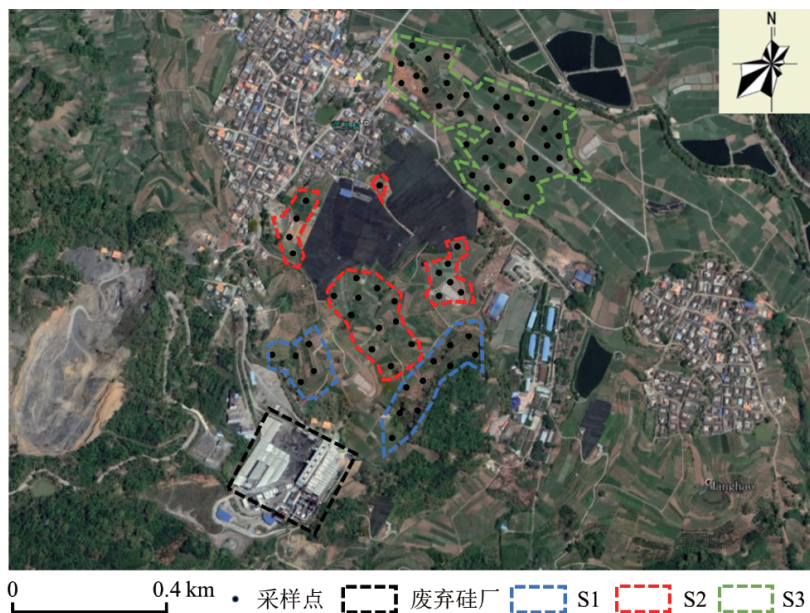


图1 研究区采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling points in the study area

S1为果园(距硅厂150~600 m),S2(水田,距硅厂400~900 m)和S3(水田,距硅厂1 000~1 500 m)为稻田。由于自然田块分布不规则,S1由两块果园组成,果园间间隔为荒地,其余为林地;S2由4块稻田组成,稻田间间隔主要为人工大棚,采用高架栽培铁皮石斛,不属于典型农用地类型,其余为荒地;S3田块分布较均匀。于2020年8月底农作物成熟时对土壤进行采样。土壤样品的采集方法参见《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),每个自然地块作为一个样方采集一个土壤样本,样方内采用五点采样法,用土壤取样器取0~20 cm的耕层土壤,去除土样中的砂石、植物残体,每个采样点采集不少于500 g的土壤样品;将样方内土样混合均匀,在现场用四分法进行混合样品的分装,最终保留1 000 g以上土样,装入聚乙烯自封袋中。样品采集后进行标记编号,用GPS记录经纬度。研究区内共采集土壤样品77个,其中,S1为果园土( $n=15$ ),S2( $n=22$ )和S3( $n=40$ )为水稻土。

将土样自然风干后,倒在有机玻璃板上,用木锤敲打、压碎,拣出杂质,混匀后过20目尼龙筛,取一部分土样进行pH分析;余下土样研磨并全部过100目筛,用于土壤重金属全量分析。

#### 1.2.2 样品的分析测定

测定的土壤理化性质包括pH值和Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg、As含量。采用KCl浸提法测定pH值(NY/T 1377—2007);将制备好的待测土样用HCl-

HNO<sub>3</sub>消解,原子荧光光谱法测定Hg和As的含量(GB/T 22105.1—2008和GB/T 22105.2—2008);待测土样经HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消解后,火焰原子吸收分光光度法测定Zn、Cu、Ni和Cr的含量(HJ 491—2019);石墨炉原子吸收分光光度法测定Cd和Pb的含量(GB/T 17141—1997)。测定全程采用空白、10%平行样和国家土壤标准物质(GBW07405)进行质量控制,各金属元素的加标回收率为85%~106%。

### 1.3 土壤污染评价方法

#### 1.3.1 单项污染指数法

单项污染指数( $P_i$ )是土壤表层重金属污染物浓度与污染物评价标准的比值,能够准确反映某一位点单项重金属污染状况。 $P_i$ 值与污染程度呈正比,其等级划分标准见表1,其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中: $P_i$ 为土壤中重金属污染物 $i$ 的单项污染指数; $C_i$ 为表层土壤中第 $i$ 种重金属的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $S_i$ 为重金属 $i$ 的土壤环境质量标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤环境质量标准见表2,本研究以《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的农用地国家筛选值为评价标准。

#### 1.3.2 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数( $P_{\text{综}}$ )涵盖各单项污染指数,并突出高浓度污染物在评价结果中的权重,用于评价土壤复合污染状况<sup>[22]</sup>。 $P_{\text{综}}$ 值与污染程度呈正比,其等

表1 土壤环境质量评估等级  
Table 1 Evaluation grade of soil environmental quality

| 等级<br>Grade | 单项污染指数<br>Single pollution index |                          | 内梅罗综合指数<br>Nemerow index    |                          | 综合质量影响指数<br>Influence index of comprehensive quality |                          |
|-------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|
|             | $P_i$                            | 评价结果<br>Appraisal result | $P_{\text{综}}$              | 评价结果<br>Appraisal result | $IICQ$                                               | 评价结果<br>Appraisal result |
| I           | $P_i \leq 1$                     | 无污染                      | $P_{\text{综}} \leq 0.7$     | 清洁                       | $IICQ \leq 1$                                        | 清洁                       |
| II          | $1 < P_i \leq 2$                 | 轻微污染                     | $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ | 尚清洁                      | $1 < IICQ \leq 2$                                    | 轻微污染                     |
| III         | $2 < P_i \leq 3$                 | 轻度污染                     | $1 < P_{\text{综}} \leq 2$   | 轻度污染                     | $2 < IICQ \leq 3$                                    | 轻度污染                     |
| IV          | $3 < P_i \leq 5$                 | 中度污染                     | $2 < P_{\text{综}} \leq 3$   | 中度污染                     | $3 < IICQ \leq 5$                                    | 中度污染                     |
| V           | $P_i > 5$                        | 重度污染                     | $P_{\text{综}} > 3$          | 重度污染                     | $IICQ > 5$                                           | 重度污染                     |

注:综合质量影响指数法中亚污染的等级划分依据  $IICQ$  数值,用 sub-II-V 表示。

Note: The classification of sub-pollution by the influence index of the comprehensive quality method is based on the  $IICQ$  value and is represented by sub-II-V.

表2 研究区土壤重金属背景值以及国家筛选值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
Table 2 Background value of soil heavy metals in the study area and national screening value( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

| 重金属<br>Heavy metal | 背景值<br>Background value | 国家筛选值 National screening value                                  |                                                                                    |                                                                  |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                    |                         | 水田( $\text{pH} > 7.5$ )<br>Paddy field<br>( $\text{pH} > 7.5$ ) | 旱田( $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ )<br>Dry farmland<br>( $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ ) | 旱田( $\text{pH} > 7.5$ )<br>Dry farmland<br>( $\text{pH} > 7.5$ ) |
| Cd                 | 0.22                    | 0.80                                                            | 0.30                                                                               | 0.60                                                             |
| Cr                 | 65.20                   | 350.00                                                          | 200.00                                                                             | 250.00                                                           |
| Cu                 | 46.30                   | 100.00                                                          | 200.00                                                                             | 200.00                                                           |
| Ni                 | 42.50                   | 190.00                                                          | 100.00                                                                             | 190.00                                                           |
| Pb                 | 40.60                   | 240.00                                                          | 120.00                                                                             | 170.00                                                           |
| Zn                 | 89.70                   | 300.00                                                          | 250.00                                                                             | 300.00                                                           |
| Hg                 | 0.06                    | 1.00                                                            | 2.40                                                                               | 3.40                                                             |
| As                 | 18.40                   | 20.00                                                           | 30.00                                                                              | 25.00                                                            |

级划分标准见表1,其计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \left[ (P_{\text{imax}}^2 + P_{\text{iave}}^2) / 2 \right]^{1/2}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为土壤重金属的综合污染指数; $P_{\text{imax}}$ 为土壤重金属*i*的单项污染指数的最大值; $P_{\text{iave}}$ 为各单项污染指数的平均值。

### 1.3.3 土壤和农产品综合质量影响指数法

综合质量影响指数( $IICQ$ )是在离子冲量的基础上,从土壤-植物系统的角度提出的土壤重金属污染评价方法<sup>[12]</sup>。 $IICQ$ 包含土壤综合质量影响指数( $IICQ_s$ )和农产品综合质量影响指数( $IICQ_{AP}$ )两部分,当土壤或农产品之一超标时,土壤环境质量呈亚污染状态。其环境质量等级划分见表1,具体的计算公式为:

$$RIE = \left[ \sum_{i=1}^N (C_i / C_{Si})^{1/n} \right] / N$$

$$DDDB = \left[ \sum_{i=1}^N (C_i / C_{Bi})^{1/n} \right] / N$$

$$DDSB = \left[ \sum_{i=1}^N (C_{Si} / C_{Bi})^{1/n} \right] / N$$

$$QIAP = \left[ \sum_{i=1}^N (C_{APi} / C_{LSi})^{1/n} \right] / N$$

$$IICQ_s = X \times (1 + RIE) + Y \times DDDB / DDSB$$

$$IICQ_{AP} = Z \left( 1 + QIAP / k \right) + QIAP / (k \times DDSB)$$

$$IICQ = IICQ_s + IICQ_{AP}$$

式中: $RIE$ 为土壤相对影响当量; $DDDB$ 为土壤元素测定浓度偏离背景值程度; $DDSB$ 为土壤环境质量标准偏离背景值程度; $N$ 为测定重金属的因子数, $N=8$ ;  $n$ 为元素*i*的氧化数,Cr取3、As取5、其余元素取2; $C_i$ 和 $C_{APi}$ 分别为土壤和农产品重金属*i*的测定浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{Bi}$ 为研究区土壤元素*i*的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{Si}$ 和 $C_{LSi}$ 分别为元素*i*的参比环境质量和农产品限量标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $X$ 、 $Y$ 分别为土壤元素测定值超过标准值和背景值的数目; $Z$ 为农产品中超过污染物限量标准的元素数目; $k$ 为校正因子, $k=5$ 。本研究采用《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地国家筛选值,云南土壤背景值<sup>[23]</sup>和环境质量标准见表2。

### 1.4 数据处理方法

采用 Excel 2019 进行数据的统计,采用 Origin 2019b 绘图,采用 R 4.1.0 进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量特征

各采样区表层土壤的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 和 As 含量如表3所示。累积系数  $K$  为土壤重金属实测值与土壤环境背景值的比值(图2),用以表征土壤重金属的累积程度。研究区重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 和 As 的平均值分别为 0.39、82.04、33.24、

表3 采样区重金属含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 3 Heavy metal content in the sampling area( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 重金属<br>Heavy metal | S1                    |              | S2                    |              | S3                    |              | 研究区<br>Study area |
|--------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------|
|                    | 平均值±标准差<br>Average±SD | 范围<br>Range  | 平均值±标准差<br>Average±SD | 范围<br>Range  | 平均值±标准差<br>Average±SD | 范围<br>Range  |                   |
| Cd                 | 0.19±0.10             | 0.09~0.44    | 0.69±1.46             | 0.08~7.23    | 0.31±0.07             | 0.18~0.47    | 0.39±0.80         |
| Cr                 | 88.80±8.70            | 71.44~103.67 | 85.91±16.97           | 39.97~114.91 | 77.67±22.40           | 59.27~207.91 | 82.04±19.51       |
| Cu                 | 32.20±4.17            | 25.57~41.77  | 33.15±6.05            | 21.53~45.10  | 33.77±4.99            | 24.96~47.57  | 33.24±5.21        |
| Ni                 | 45.01±4.92            | 36.20~51.70  | 48.94±8.33            | 31.55~63.29  | 42.66±4.84            | 33.58~57.25  | 44.85±6.63        |
| Pb                 | 44.04±9.96            | 34.67~67.26  | 46.40±9.29            | 29.55~68.99  | 55.22±6.29            | 41.80~71.94  | 50.62±9.43        |
| Zn                 | 138.89±110.63         | 54.51~417.34 | 130.26±51.30          | 77.62~315.68 | 87.29±19.22           | 59.55~164.35 | 109.20±62.25      |
| Hg                 | 0.10±0.04             | 0.05~0.19    | 0.22±0.23             | 0.07~1.15    | 0.08±0.02             | 0.04~0.13    | 0.12±0.14         |
| As                 | 66.46±37.16           | 29.98~148.42 | 52.98±35.74           | 16.38~170.81 | 12.15±1.81            | 8.60~19.16   | 34.40±34.52       |

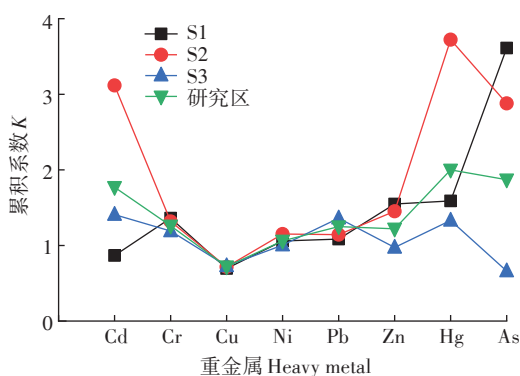


图2 研究区土壤各重金属的富集因子

Figure 2 Enrichment factors of heavy metals in the soil of the study area

44.85、50.62、109.20、0.12  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 34.40  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 分别为云南土壤背景值的 1.77、1.26、0.72、1.06、1.25、1.22、2.00 倍和 1.87 倍, 说明除 Cu 外, 其余重金属均出现不同程度的累积。S1 土壤中除 Cd 和 Cu 外, 其余重金属含量均超过了云南土壤背景值, 其中 As 累积最为严重, 是背景值的 3.61 倍; S2 土壤中除 Cu 外, 其余重金属含量均超过云南土壤背景值, 其中 Cd、Hg 和 As 累积较为严重, 分别为背景值的 3.12、3.72 倍和 2.88 倍; S3 土壤中除 Cu、Zn 和 As 外, 其余元素含量均超过云南土壤背景值, 其中 Cd 累积最严重, 是背景值的 1.41 倍。总体而言, 研究区土壤重金属出现了不同程度的累积。

通过分析重金属含量之间的相关性能够判断其来源是否相同。由表 4 可知, Cd、Zn、Hg 和 As 之间存在极显著的正相关关系, Cd、Pb 和 Zn 之间也存在极显著的正相关关系, 这说明 Cd、Zn、Hg、As 和 Pb 这 5 种重金属关系紧密, 迁移方式相似, 可能来自相同污

染源(如大气沉降)。由图 1 可知, 研究区位于废弃硅厂的下风向, 且除 Pb 外(Pb 含量在 3 个单元土壤含量相近), 土壤 Cd、Zn、Hg 和 As 均表现为随距硅厂距离越近, 含量越高( $S2 < S3$ , 图 2), 表明硅厂历史生产中的烟气排放可能加剧了周边土壤 Cd、Zn、Hg、As 的累积。另外, Cr、Cu 和 Ni 之间具有极显著的正相关关系, Cr、Cu 均和 Cd、Hg 呈显著负相关关系, 说明 Cr、Cu 和 Ni 3 种重金属来源相同(如成土母质), 并且与 Cd、Zn、Hg、As、Pb 来源不同。由图 2 可知, Cr、Cu 和 Ni 含量在研究区土壤中变化较小, 与距硅厂远近无明显关系, 因此可能来源于成土母质或受其他污染源的影响。

## 2.2 土壤重金属污染评价

### 2.2.1 单项污染指数和内梅罗综合指数评价

参照农用地土壤筛选值(GB 15618—2018), 单项污染指数和内梅罗综合指数的污染评价结果如表 5 所示。由单项污染指数可知, 采样区中, 仅 S1 和 S2 出现 As 污染, 其余重金属未造成土壤污染。其中, S1 地块中有 93% 的样点 As 含量超标, 为筛选值的 2.60 倍, 达到轻度污染(质量等级 III); S2 有 91% 的样点土壤 As 超标, 为筛选值的 2.65 倍, 达到轻度污染(质量等级 III); S3 土壤 As 未造成污染。此外, S1 地块中有两个点位出现 Zn 和 As 超标; S2 有一个点位的土壤出现 As 和 Cd 超标, 一个点位出现 As、Cd、Hg 和 Zn 超标; S3 土壤重金属未出现超标现象。总体而言, S1 土壤重金属污染程度顺序为 As(2.60 倍) > Zn(0.47 倍) > Cr(0.38 倍) > Cd(0.37 倍) > Ni(0.29 倍) > Pb(0.28 倍) > Cu(0.16 倍) > Hg(0.11 倍); S2 土壤重金属污染程度顺序为 As(2.65 倍) > Cd(0.86 倍) > Zn(0.43 倍) > Cu(0.33 倍) > Ni(0.26 倍) > Cr(0.25 倍) > Hg(0.22 倍) > Pb(0.19



倍);S3土壤重金属污染程度顺序为As(0.61)>Cd(0.39)>Cu(0.34倍)>Zn(0.29倍)>Pb(0.23倍)>Cr(0.22倍)=Ni(0.22倍)>Hg(0.08倍)。此外,计算得到的S1、S2和S3土壤的内梅罗综合指数的均值分别为1.88、1.95和0.48,由表1可知,S1和S2土壤呈轻度污染(质量等级Ⅲ),S3土壤呈清洁状态(质量等级Ⅰ)。

## 2.2.2 土壤和农产品综合质量影响指数评价

研究区的 $IICQ_s$ 以及各评价参数如表6所示。土壤样点中超过标准值的重金属种数 $X$ 的均值依次为S2(1.14)>S1(1.07)>S3(0);超过背景值的重金属种数 $Y$ 的均值依次为S2(5.91)>S1(4.67)>S3(4.55);3个采样区的 $RIE$ 和 $DDDB$ 值相近,说明研

究区土壤环境质量受外源物质影响相近; $DDSB$ 值大小依次为S1(19.25)>S2(16.88)=S3(16.88),说明S1土壤具有更高的土壤负载容量,对外源物质的缓冲性更强。

由于采样时部分农产品未和土样同时采集或农产品中大部分重金属未检出,因此本研究不进行 $QIAP$ 和 $IICQ_{AP}$ 的计算。采用 $IICQ_s$ 进行区域土壤质量环境评价,评价结果采用亚污染等级划分。

根据 $IICQ_s$ 指数,结合表1可知采样区的土壤环境质量状况。S1和S2土壤处于亚污染状态,S1质量等级为sub-Ⅱ,S2质量等级为sub-Ⅲ,而S3呈清洁状态(质量等级Ⅰ)。

表4 研究区不同重金属含量之间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of different heavy metal contents in the study area

| 重金属 Heavy metal | Cd      | Cr      | Cu       | Ni     | Pb      | Zn      | Hg      | As |
|-----------------|---------|---------|----------|--------|---------|---------|---------|----|
| Cd              | 1       |         |          |        |         |         |         |    |
| Cr              | -0.244* | 1       |          |        |         |         |         |    |
| Cu              | -0.262* | 0.457** | 1        |        |         |         |         |    |
| Ni              | -0.063  | 0.616** | 0.698**  | 1      |         |         |         |    |
| Pb              | 0.296** | -0.119  | 0.252*   | 0.019  | 1       |         |         |    |
| Zn              | 0.454** | 0.158   | 0.101    | 0.212  | 0.382** | 1       |         |    |
| Hg              | 0.894** | -0.224* | -0.323** | -0.045 | 0.137   | 0.521** | 1       |    |
| As              | 0.499** | 0.010   | -0.181   | 0.084  | 0.006   | 0.842** | 0.679** | 1  |

注:\*表示在0.05水平上显著相关,\*\*表示在0.01水平上显著相关。

Note:\* indicates significant correlation at 0.05 level, and \*\* indicates significant correlation at 0.01 level.

表5 研究区土壤重金属单项污染指数和内梅罗综合指数评价结果

Table 5 Evaluation results of soil heavy metal single pollution index and Nemerow index in the study area

| 采样区<br>Sampling area | 单项污染指数 Single pollution index |           |           |           |           |           |           |           | 内梅罗综合指数<br>Nemerow index | 评价等级<br>Appraisal grade |
|----------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------------|
|                      | Cd                            | Cr        | Cu        | Ni        | Pb        | Zn        | Hg        | As        |                          |                         |
| S1                   | 0.37±0.16                     | 0.38±0.05 | 0.16±0.02 | 0.29±0.08 | 0.28±0.05 | 0.47±0.36 | 0.03±0.01 | 2.60±1.54 | 1.88±1.10                | Ⅲ(轻度污染)                 |
| S2                   | 0.86±1.82                     | 0.25±0.05 | 0.33±0.06 | 0.26±0.04 | 0.19±0.04 | 0.43±0.17 | 0.22±0.23 | 2.65±1.79 | 1.95±1.36                | Ⅲ(轻度污染)                 |
| S3                   | 0.39±0.09                     | 0.22±0.06 | 0.34±0.05 | 0.22±0.03 | 0.23±0.03 | 0.29±0.06 | 0.08±0.02 | 0.61±0.09 | 0.48±0.06                | Ⅰ(清洁)                   |

表6 研究区土壤综合质量影响指数评价结果

Table 6 Evaluation results of influence index of comprehensive quality of soil in the study area

| 评价指标<br>Evaluation index | S1                    |             | S2                    |             | S3                    |             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
|                          | 平均值±标准差<br>Average±SD | 范围<br>Range | 平均值±标准差<br>Average±SD | 范围<br>Range | 平均值±标准差<br>Average±SD | 范围<br>Range |
| $X$                      | 1.07±0.44             | 0~2         | 1.14±0.76             | 0~4         | 0                     | 0           |
| $Y$                      | 4.67±1.58             | 2~7         | 5.91±1.20             | 3~7         | 4.55±1.26             | 2~8         |
| $RIE$                    | 0.60±0.07             | 0.51~0.75   | 0.64±0.11             | 0.53~1.07   | 0.56±0.03             | 0.51~0.63   |
| $DDDB$                   | 1.07±0.15             | 0.92~1.40   | 1.21±0.25             | 0.98~2.18   | 1.04±0.06             | 0.94~1.17   |
| $DDSB$                   | 19.25±1.26            | 17.16~20.01 | 16.68±0.01            | 16.68       | 16.68±0.01            | 16.68       |
| $IICQ_s$                 | 1.99±0.87             | 0.17~4.00   | 2.38±1.65             | 0.18~8.95   | 0.29±0.09             | 0.11~0.52   |

### 3 讨论

研究区废弃硅厂周边农田土壤中Cd、Cr、Ni、Pb、Zn、Hg和As的含量均超过云南土壤背景值,说明这些重金属在农田土壤中存在累积效应。由表2可知,云南省土壤As的背景值与《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的农用地国家筛选值较为接近,易发生As累积和污染的现象。S1和S2农田土壤中As含量超过国家筛选值,含量平均值分别为 $66.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $52.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。单项污染指数法表明,S1和S2农田土壤中As出现轻度污染,点位超标率分别为93%和91%,平均含量为筛选值的2.60倍和2.65倍;而S3土壤重金属未造成污染。因此,As是该地区土壤的主要污染物,应尽快开展As污染的治理工作。

重金属污染的同源性可以通过分析土壤重金属元素含量的相关性进行推测<sup>[24-25]</sup>。通常相同来源的重金属之间具有显著的相关性。因此,通过分析土壤重金属之间相关性的显著水平,可以探究土壤重金属污染的来源<sup>[26-27]</sup>。相关性分析表明,Cd、Zn、Hg、As和Pb这5种元素呈极显著正相关,可能来自相同的污染源,例如大气沉降。有研究表明,Cd、Hg、As和Pb的大气沉降贡献率占我国农田土壤重金属总输入量的42%~86%,大气沉降已成为农田土壤重金属的重要来源<sup>[28-29]</sup>。硅厂生产会对周围土壤造成严重的Zn、Pb、Cd和As污染<sup>[20-21,30]</sup>。重金属通过煤等化石燃料的燃烧进入大气,吸附于气溶胶分子上,后经过干湿沉降进入到农田生态系统中<sup>[31]</sup>。该硅厂采用碳热还原法炼制金属硅,冶炼过程中使用大量烟煤等化石燃料<sup>[19]</sup>,熔炼装置采用半封闭矿热炉,其漏风率高、排烟量大<sup>[32]</sup>。研究区盛行西南风,农田位于废弃硅厂下风向,S1和S2距离废弃硅厂不足900 m,且均出现了As污染;而S3距离硅厂较远,未出现As污染,且重金属Cd、Zn和Hg的累积效应也比S1和S2小。因此,废弃硅厂的历史生产活动可能是研究区农田土壤As污染和重金属积累的重要原因。另外,Cr、Cu和Ni在研究区土壤中含量变化较小(图2),3种重金属之间具有极显著的正相关关系,且与Cd、Zn、Hg、As和Pb这5种元素呈显著负相关或不相关,因此可能来自不同的污染源,例如土壤母质或受其他污染源的影响,有待进一步研究。

合理的农田土壤污染评价方法一直备受环境工作者关注。单项污染指数计算较简便,适用于特定重

金属的土壤污染状况评价,例如S1和S2土壤As呈Ⅲ等轻度污染,而其余重金属未出现污染情况。此前,在环境保护部发布的《土壤环境质量评价规范(二次征求意见稿)》中,推荐取单项污染指数法得出的各种重金属指数的最大值作为土壤多项污染物的污染指数,其土壤质量评价等级的划分与单项污染指数等级一致。虽然在土壤环境质量的制定中考虑了人体健康和生态安全等相关因素,但仅考虑最大单项污染指数的评价体系没有毒理学支撑,并易受异常值的影响<sup>[12]</sup>。基于单项污染指数的内梅罗综合指数也存在同样的问题,该方法在污染评价时,将各重金属单项污染指数的最大值和平均值视为同等重要的参数,评价的结果易受到不规范采样和检测产生的最大值与异常值的影响,从而导致其灵敏度降低<sup>[33]</sup>。与此同时,内梅罗综合指数法缺乏对重金属形态的毒性效应和区域背景值差异的考虑,因此使用时最好结合其他方法进行全面合理的评价<sup>[11]</sup>。综合质量影响指数法综合考虑了多种土壤参数和农产品参数,可应用于农田土壤单独和复合污染的评价<sup>[12-14,26]</sup>。该方法在以土壤相对影响当量(RIE)表征其毒性效应的同时,还综合考虑了土壤元素累积程度(即元素测定浓度偏离背景值程度,DDDB)和土壤负载容量(即土壤标准偏离背景值程度,DDSB)。云南省的土壤元素背景值较高,因此土壤重金属累积效应比较明显<sup>[15,34]</sup>。研究区Cd、Cr、Ni、Pb、Zn、Hg和As均存在不同程度的累积,这些累积在土壤质量评估中不应被忽略。同样地,重金属的土壤背景值与相对应的环境质量标准之间的差值,即土壤标准偏离背景值程度(DDSB)也应被纳入考虑,其可以反映土壤负载容量。土壤负载容量指在特定时限的环境单元内,按照环境质量标准,满足农产品产量、品质以及环境质量时土壤负荷污染物的最大值<sup>[35]</sup>。就S1土壤而言,内梅罗综合指数法将其评价为轻度污染(质量等级Ⅲ),而综合质量影响指数法将其划分为潜在轻微污染(sub-Ⅱ)。这是由于综合质量影响指数法评估了土壤环境负载容量的结果。S1土壤DDSB较高(19.25),对外源重金属的缓冲能力较强,即在给定的环境标准下,土壤可以容纳更多的重金属而不超标。因此,利用综合质量影响指数法评价研究区农田土壤的污染状况更加合理。

### 4 结论

(1)废弃硅厂下风向1 500 m范围内农田表层土壤Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg和As的平均值分别为



0.39、82.04、33.24、44.85、50.62、109.20、0.12  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 34.40  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 分别为云南土壤背景值的 1.77、1.26、0.72、1.06、1.25、1.22、2.00 倍和 1.87 倍, 除 Cu 外, 其余重金属均超过云南土壤背景值。研究区农田土壤重金属出现不同程度的累积。

(2) 土壤重金属的相关性分析表明, Cd、Zn、Hg、As 和 Pb 彼此之间呈极显著正相关, 来自同一污染源, 可能为硅厂历史生产排放的煤烟; Cr、Cu 和 Ni 彼此具有极显著的正相关关系, 且与 Cd、Zn、Hg、As 和 Pb 呈显著负相关或不相关, 说明 Cr、Cu、Ni 这 3 种重金属来自另一污染源, 可能为成土母质或其他污染源, 有待进一步研究。

(3) 单项污染指数表明, 废弃硅厂周边部分农田土壤 As 存在超标现象。其中, S1 和 S2 土壤 As 达到轻度污染(质量等级 III), S3 土壤未受到污染, 说明 As 为研究区土壤的主要污染物, 应重点关注。内梅罗综合指数表明, S1 和 S2 土壤为轻度污染(质量等级 III), S3 呈清洁状态(质量等级 I)。综合质量影响指数表明, S1(质量等级 sub-II) 和 S2(质量等级 sub-III) 土壤处于亚污染状态, 而 S3 呈清洁状态(质量等级 I)。距废弃硅厂较近的土壤呈现重金属综合污染, 应开展修复工作。

(4) 仅考虑环境质量标准的内梅罗综合指数在土壤重金属普遍累积的农田土壤污染评价时有些许不足, 相比之下, 研究区农田土壤环境质量可以通过土壤综合质量影响指数法得到较好的评估。

#### 参考文献:

- [1] 徐建明, 刘杏梅. “十四五”土壤质量与食品安全前沿趋势与发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1143–1154. XU J M, LIU X M. Frontier trends and development strategies of soil quality and food safety in the 14th Five-Year Plan[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1143–1154.
- [2] ZHANG X, ZHONG T, LIU L, et al. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0135182.
- [3] 环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2021-07-20]. [http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content\\_2661768.htm](http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm). Ministry of Environmental Protection. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. (2014-04-17) [2021-07-20]. [http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content\\_2661768.htm](http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm).
- [4] 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 F J, XIE W Y, WANG P. Soil and human health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 1–11.
- [5] 马先杰, 陆凤, 陈兰兰, 等. 贵州水城典型铅锌矿区土壤和蔬菜中重金属累积特征及风险评价[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(10): 1227–1232. MA X J, LU F, CHEN L L, et al. Accumulation characteristics and risk assessment for heavy metals in soil and vegetables in a typical lead-zinc mining region of Shuicheng, Guizhou[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(10): 1227–1232.
- [6] 施择, 孙鑫, 宁平, 等. 云南新平铜尾矿库周边土壤重金属污染评价[J]. 矿冶, 2014, 23(4): 92–96. SHI Z, SUN X, NING P, et al. Assessment of heavy metals pollution in soil in copper tailing dam region of Xinping, Yunnan Province[J]. *Mining and Metallurgy*, 2014, 23(4): 92–96.
- [7] DRAGOVIĆ R, GAJIĆ B, DRAGOVIĆ S, et al. Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 550–562.
- [8] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310–315. FAN S X, GAN Z T, LI M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 310–315.
- [9] 刘德成, 李玉倩, 郑纯静, 等. 土壤重金属污染风险评价方法对比研究[J]. 河北农业科学, 2020, 24(4): 89–95. LIU D C, LI Y Q, ZHENG C J, et al. Comparative study on risk assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(4): 89–95.
- [10] 唐功政, 刘国栋, 高润青, 等. 利用单因子污染指数与内梅罗综合指数进行土壤重金属污染程度评级[J]. 科技风, 2019(13): 125–126. TANG G Z, LIU G D, GAO R Q, et al. Single factor pollution index and Nemerow index were used to grade the soil heavy metal pollution degree[J]. *Technology Wind*, 2019(13): 125–126.
- [11] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2365–2378. WANG Y J, WU T L, ZHOU D M, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2365–2378.
- [12] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法: 土壤和农产品综合质量指数法[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1225–1232. WANG Y J, LIU C, ZHOU D M, et al. A new approach for evaluating soil heavy metal impact: A comprehensive index combined soil environmental quality and agricultural products quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1225–1232.
- [13] 贺新星, 魏芳, 范健, 等. 宁连高速两侧土壤及小麦重金属污染特征研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(5): 28–32. HE X X, WEI F, FAN J, et al. Research of heavy metals pollution in soils and wheat on both sides of Lianyungang-Nanjing expressway[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2020, 32(5): 28–32.
- [14] 沈乾杰, 刘品桢, 杜启露, 等. 废弃铅锌矿区复耕后土壤-作物重金属污染特征及修复措施[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 223–230. SHEN Q J, LIU P Z, DU Q L, et al. Characteristics and restoration measures for heavy metal polluted soil-crop systems after recultivation in abandoned lead and zinc[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 223–230.

- [15] 王红华, 严婷婷. 云南省高背景值耕地土壤现状与作物积累状况初探[C]//全国耕地土壤污染监测与评价技术研讨会论文集. 天津:农业部环境监测总站, 2006:130-135. WANG H H, YAN T T. Preliminary study on soil status and crop accumulation status of cultivated land with high background value in Yunnan Province[C]//Proceedings of the national symposium on monitoring and evaluation of soil pollution in cultivated land. Tianjin: Environmental Monitoring Station of Ministry of Agriculture, 2006:130-135.
- [16] 陈云进, 李振宇, 杨树平, 等. 云南农业土壤重金属污染防治对策初步研究[C]//2017中国环境科学学会科学与技术年会论文集. 厦门:中国环境科学学会, 2017:368-373. CHEN Y J, LI Z Y, YANG S P, et al. Preliminary study on prevention and control measures of heavy metal pollution in agricultural soils in Yunnan[C]//2017 science and technology annual meeting of Chinese Society for Environmental Science. Xiamen: Chinese Society for Environmental Science, 2017:368-373.
- [17] 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.
- [18] 雷冬梅, 段昌群, 王明. 云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):612-616. LEI D M, DUAN C Q, WANG M. Soil fertility and heavy metal contamination in abandoned regions of different mine tailings in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):612-616.
- [19] 单继周, 蒋元力, 曹国喜. 工业硅的生产工艺条件研究进展[J]. 河南化工, 2011, 28(6):21-24. SHAN J Z, JIANG Y L, CAO G X. Research progress of industrial silicon production process conditions [J]. *Henan Chemical Industry*, 2011, 28(6):21-24.
- [20] 朱守立, 詹孝慈. 贵州黎平某硅厂周边土壤重金属含量分析与污染状况评价[J]. 科技资讯, 2014(33):101. ZHU S L, ZHAN X C. Heavy metal content analysis and pollution assessment of soil around a silicon plant in Liping, Guizhou[J]. *Science & Technology Information*, 2014(33):101.
- [21] 刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(5):1048-1059. LIU P, HU W Y, HUANG B, et al. Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5):1048-1059.
- [22] CHENG J L, SHI Z, ZHU Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(1):50-54.
- [23] 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. EPA China National Environmental Monitoring Centre, China. China's soil element background values[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [24] 柴世伟, 温琰茂, 韦献革, 等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4):90-94. CHAI S W, WEN Y M, WEI X G, et al. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(4):90-94.
- [25] 陈雯, 龙翔, 王宁涛, 等. 福州市土壤重金属污染现状评价与分析[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(5):68-72. CHEN W, LONG X, WANG N T, et al. Pollution evaluation and analysis of heavy metals in soils of Fuzhou City[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015, 22(5):68-72.
- [26] 樊倍希, 张永清. 山西某火力发电厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7):953-960. FAN B X, ZHANG Y Q. Evaluation of heavy metal pollution in farmland around a thermal power plant in Shanxi Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7):953-960.
- [27] TAYLOR M D. Accumulation of cadmium derived from fertilisers in New Zealand soils[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 208(1/2):123-126.
- [28] LUO L, MA Y B, ZHANG S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2524-2530.
- [29] HOU Q Y, YANG Z F, JI J F, et al. Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139:68-84.
- [30] HAO P, CHEN Y, WENG L, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in north and south China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660:776-786.
- [31] CONNAN O, MARO D, HEBERT D, et al. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 67:394-403.
- [32] 吕钧, 王忠顺, 张玉杰, 等. 硅冶炼烟气减量化的分析与探讨[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(3):64-66. LÜ J, WANG Z S, ZHANG Y J, et al. Analysis and discussion of flue gas reduction in silicon smelting [J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2021, 37(3):64-66.
- [33] 师荣光, 高怀友, 赵玉杰, 等. 基于GIS的混合加权模式在天津城郊土壤重金属污染评价中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1):17-20. SHI R G, GAO H Y, ZHAO Y J, et al. Assessment of pollution of heavy metals in soils of Tianjin suburb by a mixed weighted model based on GIS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl 1):17-20.
- [34] 吴见珣, 杨赵, 杨涛明, 等. 云南某典型喀斯特区域农田土壤镉、砷污染特征及来源[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(3):28-33, 47. WU J X, YANG Z, YANG T M, et al. Pollution characteristics and source analysis of cadmium and arsenic in farmland soils of a typical karst region in Yunnan[J]. *Environmental Science Survey*, 2021, 40(3):28-33, 47.
- [35] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 三版. 北京:科学出版社, 2010:189-192. CHEN H M. Environmental soil science[M]. 3rd Edition. Beijing: Science Press, 2010:189-192.

(责任编辑:宋潇)