

珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染状况及其风险性分析

姚波, 杨爱萍, 陈华毅, 高健鹏, 张玉龙, 王进进, 李永涛, 任宗玲

引用本文:

姚波, 杨爱萍, 陈华毅, 等. 珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染状况及其风险性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2259–2266.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0286>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南岭泡金山矿产集采区土壤重金属空间分布及风险评价

刘芳枝, 胡俊良, 刘劲松, 赵震乾, 杨雪, 张煜, 罗朝晖

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 86–95 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1136>

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>

湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价

刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 安毅, 霍莉莉

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1523–1530 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1491>

典型铅锌矿区河流沿岸农田土壤重金属分布特征及潜在生态风险评价

郭朝晖, 涂卫佳, 彭驰, 黄博, 肖细元, 薛清华

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2029–2038 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0386>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚波, 杨爱萍, 陈华毅, 等. 珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染状况及其风险性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2259–2266.

YAO Bo, YANG Ai-ping, CHEN Hua-yi, et al. Soil heavy metal pollution and risk assessment of agricultural soils in the Yunnan-Guizhou area, Upper Pearl River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2259–2266.



开放科学 OSID

珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染状况及其风险性分析

姚波, 杨爱萍, 陈华毅, 高健鹏, 张玉龙, 王进进, 李永涛*, 任宗玲*

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:为探明珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染水平及其潜在生态风险,在珠江水系上游南盘江流域的云南省曲靖市沾益区废弃磷肥厂工业区(ZY)和陆良县历史铬渣堆放点及冶炼工业区(LL)、个旧市鸡街镇铅锌冶炼厂(JJ)和大屯镇松树脚矿区(DT)、北盘江流域的贵州省六盘水市杉树林铅锌矿区(SSL)、都柳江流域的贵州省黔南布依族苗族自治州乌龙沟铅锌矿区(WLG),采集不同工矿污染源及不同土地利用类型影响下的42个水田土样及63个旱地土样,运用单因子指数法及内梅罗综合指数法分析了土壤重金属富集特征,利用Hakanson潜在生态危害指数法进行了潜在生态风险评估。结果表明:6个采样地区土壤均污染严重,含量超标率分别为Cd(95.24%)>As(53.33%)>Pb(42.86%)>Zn(30.48%)>Cu(26.67%)>Cr(12.38%)>Hg(6.67%)>Ni(5.71%)。综合污染指数结果表明6个采样区土壤均为重度污染水平,污染程度为JJ>SSL>DT>LL>ZY>WLG,以南盘江中游个旧地区最为严重。6个采样区土壤重金属潜在生态危害风险指数(RI)大小依次为JJ>DT>SSL>LL>ZY>WLG,其中JJ地区土壤达极高等潜在风险,SSL、LL、DT地区土壤存在高等潜在风险,ZY及WLG地区则为中高等潜在风险水平,重金属Cd对潜在生态风险评价贡献最大,其次为Hg。因此,对珠江上游地区矿区周边农田土壤进行管控时不仅要注意Cd污染,还应注意Hg、As等元素的富集程度及潜在污染风险。

关键词:土壤;重金属;生态风险;珠江流域上游

中图分类号:X53;X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2259-08 doi:10.11654/jaes.2020-0286

Soil heavy metal pollution and risk assessment of agricultural soils in the Yunnan-Guizhou area, Upper Pearl River Basin

YAO Bo, YANG Ai-ping, CHEN Hua-yi, GAO Jian-peng, ZHANG Yu-long, WANG Jin-jin, LI Yong-tao*, REN Zong-ling*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:To obtain a better overview of the status and potential ecological risks of heavy metal pollution in agricultural soils in the Yunnan-Guizhou area in the upper reaches of the Pearl River Basin, 42 paddy soils and 63 dry land soils were collected from six industrial and mining sites in this area, including (1) an abandoned phosphate fertilizer plant industrial area in Zhanyi District(ZY), Qujing City, Yunnan Province; (2) a historical Cr slag storage area and smelting industrial area in Luliang County(LL), Qujing City, Yunnan Province; (3) a Pb and Zn smelter in Jijie Town(JJ), Gejiu City, Yunnan Province; (4) the Songshujiao mining area in Datun Town(DT), Gejiu City, Yunnan Province; (5) the Shanshulin Pb-Zn mining area(SSL) in Liupanshui City, Guizhou Province; and (6) the Wulonggou Pb-Zn mining area(WLG) in Qiannan Boeyi and Miao Autonomous Prefecture, Guizhou Province. The single factor pollution index, Nemero integrated

收稿日期:2020-03-15 录用日期:2020-04-30

作者简介:姚波(1996—),男,江西吉安人,硕士研究生,从事土壤重金属形态分析研究。E-mail:yaob1996@163.com

*通信作者:李永涛 E-mail:yongtao@scau.edu.cn; 任宗玲 E-mail:zren@scau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800300);国家自然科学基金重点项目(41811530277, U1401234, 41601227, 41701262)

Project supported: National Key R&D Program of China (2016YFD0800300); The National Natural Science Foundation of China (41811530277, U1401234, 41601227, 41701262)

pollution index, and Hakanson potential ecological risk index were used for the evaluation of potential environmental risks of heavy metals in these soils. The results showed that the soils from the six sites were mostly heavily contaminated. Compared with the national standard values, the rates of exceedance of the standards followed the order of Cd(95.24%)>As(53.33%)>Pb(42.86%)>Zn(30.48%)>Cu(26.67%)>Cr(12.38%)>Hg(6.67%)>Ni(5.71%). The integrated pollution indexes suggested that the six sites were all exposed to heavily integrated pollution with the order of JJ>SSL>DT>LL>ZY>WLG, and the sites from Gejiu in the middle reaches of the Nanpan River were the most severely contaminated. The potential ecological risk index of soil heavy metals in the six sites followed the sequence of JJ>DT>SSL>LL>ZY>WLG. These metals posed a very high potential risk in JJ, a high potential risk in SSL, LL, and DT, and a medium/high potential risk in ZY and WLG. Among the metals, Cd was the most important risk factor, followed by Hg. Therefore, in addition to Cd pollution, Hg, As, and other trace elements should be taken into consideration for the soil management and control in the upper reaches of the Pearl River Basin.

Keywords: soil; heavy metal; ecological risk; Upper Pearl River Basin

土壤是农业生产的基础,也是生态环境的重要组成部分^[1]。当前,土壤重金属污染已成为危害我国土壤环境质量及粮食安全的主要问题^[2-3]。农田土壤中重金属的富集不仅影响土壤微生物活性,阻碍作物生长发育,导致土壤生产力下降,同时造成农产品中重金属的过量积累,最终威胁人类健康^[4-6]。

土壤中重金属来源广泛,一部分来源于工业生产过程及金属矿山开采冶炼所产生的各种尾矿和“三废”、农业生产中使用农药化肥、污水灌溉或汽车尾气排放等人类活动^[7-9],这些过程产生的重金属通过雨水淋溶、大气沉降和灌溉进入土壤中进而导致土壤重金属的富集;另一部分则是由于地质高背景母岩在成土过程中风化或原地堆积成为残坡积土、异地搬运后形成冲积土等行为造成^[10]。

珠江流经云南、贵州、广西和广东三省一区,全流域占地面积不足国土面积的5%,但是其GDP约占全国GDP的13%^[11]。高速的经济发展和城市化进程造成珠江流域生态环境恶化,土壤重金属污染加剧。多年来,对于珠江流域土壤重金属污染的研究主要集中在经济发达的下游地区,而上游流域土壤重金属污染状况研究较少。然而,上游西南地区是我国重要矿带和采矿基地,随着经济逐步发展,其土壤重金属污染状况也日趋严峻。珠江源头南盘江流域的陆良县工业企业众多,工艺落后,发展方式粗放,产生大量含As、Cr、Pb等的废水废渣,给土壤和地下水带来巨大的环境风险^[12]。同时,由于重金属含量高的石灰岩风化释放重金属进入土壤环境中,珠江上游地区土壤还存在重金属背景值远高于全国土壤背景值的问题^[13-14]。因此,珠江上游地区土壤呈现出高自然背景和外源重金属污染叠加态势,生态环境风险不容忽视。

本文选取珠江上游南盘江流域、北盘江流域及都柳江流域6个典型工矿区周边土壤为研究对象,共采

集42个水田土壤样品及63个旱地土壤样品,分析土壤样品中Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr和Zn 8种重金属含量,采用单项污染指数法及内梅罗综合污染指数法分析土壤中重金属污染程度,采用Hakanson潜在生态危害指数法进行污染生态风险评价,旨在明确珠江流域上游地区土壤重金属污染状况及环境风险,为其污染治理及修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集及分析

如图1所示,土壤样品采集于珠江水系上游南盘江流域的云南省曲靖市及个旧市、北盘江流域的贵州省六盘水市、都柳江流域的贵州省黔南布依族苗族自治州(图1)。其中在珠江源头云南省曲靖市沾益区废弃磷肥厂工业区(ZY,25°36'N,103°48'E)周边采集水田土样8个、旱地土样10个;曲靖市陆良县历史铬渣堆放点及冶炼工业区(LL,25°00'N,103°35'E)周边采集水田土样10个、旱地土样10个。顺南盘江而下,在云南省个旧市鸡街镇铅锌冶炼厂(JJ,23°30'N,103°14'E)周边采集水田土样9个、旱地土样10个,个旧市大屯镇松树脚矿区(DT,23°23'N,103°16'E)周边采集水田土样6个、旱地土样12个。在北盘江流域,于贵州省六盘水市水城县杉树林铅锌矿(SSL,26°28'N,105°04'E)周边采集旱地土样8个。在都柳江流域黔南布依族苗族自治州三都水族自治县乌龙沟铅锌矿(WLG,26°03'N,107°54'E)周边采集水田土样9个、旱地土样13个。采样点的设置综合考虑了河流及污染源距离、土地利用类型等因素,采样点均设置在距离河流及污染源10 km范围内,水田和旱地样点尽量相邻。采集0~20 cm耕层土壤,每个土壤样品用五点混合法采集,混匀后取样1 kg,装入标有标签的封口袋中,带回实验室分析。

土样在实验室自然风干后去除其中的石块、植物

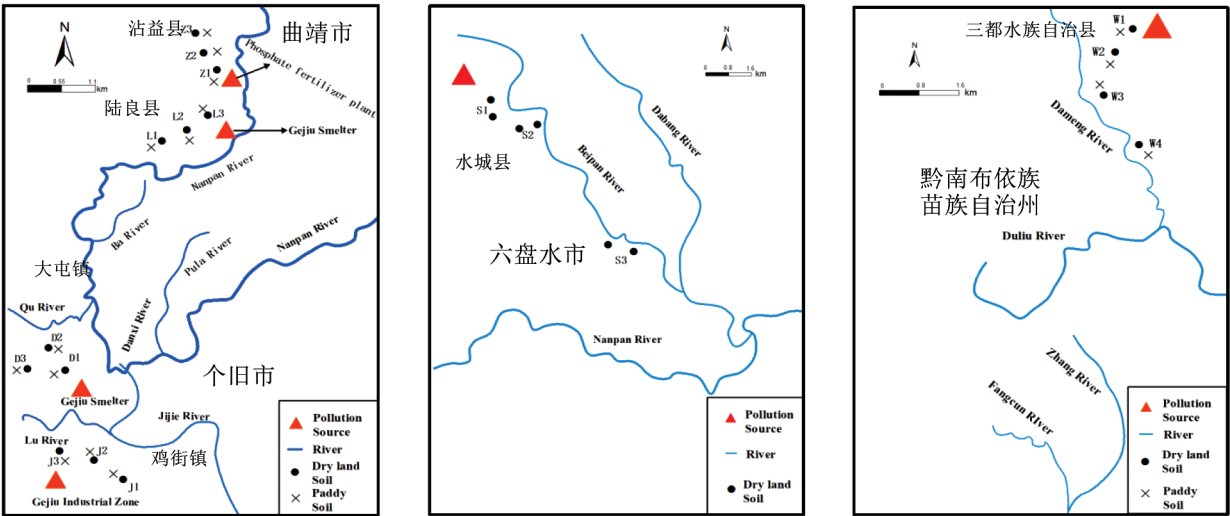


图1 采样区域示意图
Figure 1 Schematic diagram of sampling sites

根系等,研磨过2 mm和0.15 mm尼龙筛后用封口袋装好,其中过2 mm的土壤用于测定土壤pH,过0.15 mm的土壤用于测定各种重金属含量。土壤pH按水土比2.5:1(V/m)浸提后用pH计测定。土壤中重金属全量依据《土壤和沉积物金属元素总量的消解 微波消解法》(HJ 832—2017)消解后待测,其中Cd含量采用石墨炉原子吸收光谱仪 (Analytik Jena ZEE nit 650P)测定,Ni、Cr、Pb、Cu、Zn使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Agilent ICP-OES 5100)测定,Hg、As采用原子荧光光谱仪 (AFS-933)测定。重金属全量分析过程中以环境标准物质土壤GBW07430(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所)为质量控制样品,得到质控样品的各项重金属元素含量回收率均在91%~107%范围内,同时在一定样品数之间加入平行样,平行样标准偏差均在9%以内。

1.2 土壤重金属污染评价方法

1.2.1 单项污染指数分析

土壤单项污染指数分析是通过判断样本与评价标准的比值,简单评价主要污染因子及污染状况^[15]。计算公式为:

$$P_i=C_i/S_i$$

式中: P_i 为重金属*i*的单项污染指数; C_i 为重金属*i*的含量实际值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为样品重金属*i*含量的限量标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中污染风险筛选值作为限量标准值^[16]。土壤单项污染指数分级标准^[17]见表1。

表1 单项污染指数评价等级		
Table 1 Grading of single factor pollution index		
污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution degree	污染评价 Pollution assessment
$P_i\leq 1$	1	无污染
$1<P_i\leq 2$	2	轻微
$2<P_i\leq 3$	3	轻度
$3<P_i\leq 5$	4	中度
$P_i>5$	5	重度

1.2.2 综合污染指数分析(内梅罗综合污染指数法)
为了更加全面地反映多种重金属的土壤污染状况,在单项污染指数分析的基础上引入内梅罗综合污染指数法,该方法不仅考虑到污染因子的平均污染状况,还突出强调污染数值最大的因子,同时在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响^[3]。采样点的综合污染指数 $P_{\text{综}}$ 计算式为:

$$P_{\text{综}}=[\{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2+(C_i/S_i)_{\text{ave}}^2\}/2]^{1/2}$$

式中: $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为采样点土壤重金属单项污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为采样点土壤重金属单项污染指数的平均值^[18]。土壤综合污染指数分级标准^[17]如表2。

表2 综合污染指数评价等级		
Table 2 Grading of integrated pollution index		
污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution degree	污染水平 Pollution level
$P_{\text{综}}\leq 0.7$	安全	清洁
$0.7<P_{\text{综}}\leq 1$	警戒限	尚清洁
$1<P_{\text{综}}\leq 2$	轻污染	土壤开始受到污染
$2<P_{\text{综}}\leq 3$	中污染	土壤中度污染
$P_{\text{综}}>3$	重污染	土壤受污染已相当严重

1.2.3 潜在生态危害指数分析

由瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数分析法,通过把土壤重金属污染造成的各种生态环境影响、毒性水平及环境对重金属污染的敏感度与土壤中重金属含量相结合^[19],对土壤重金属污染生态风险程度进行评估。该方法已成为当前土壤重金属风险评估的主要方法之一。其计算方法如下:

$$E_i=T_i(C_i/C_n)$$

$$RI=\sum_{i=1}^8 E_i$$

式中: E_i 为重金属*i*的潜在生态危害指数; C_i 为土壤中重金属*i*的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_n 为重金属*i*的地区背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表3)^[20]; T_i 为重金属*i*的毒性响应系数(表4)^[21]; E_i 最低级上限值,由最大 T_i 值与 C_i/C_n 最低级上限值(为1)相乘得到($40\times 1=40$),其余级别上限值依次加倍^[22]。 RI 为多种重金属的综合潜在生态危害指数,Hakanson^[19]依据湖积物中多氯联苯、Cd、Hg、As、Pb、Cu、Cr、Zn等8种污染物的 T_i 之和(133)提出了 RI 的分级标准,其中第一级分级界限值为150。故本研究中 RI 分级标准的最低级上限值为 $(98/133)\times 150=110$,其余级别依次加倍^[21]。根据潜在生态风险指数可将土壤污染分为5个等级,见表5。

表3 云南省及贵州省土壤重金属背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Background values of soil heavy metal concentrations in Yunnan and Guizhou($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

省份 Provinces	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn
云南	0.058	0.218	18.4	40.6	46.3	42.5	65.2	89.7
贵州	0.110	0.659	99.5	95.9	66.7	33.1	20.8	20.0

表4 土壤重金属毒性响应系数

Table 4 Soil heavy metal toxicity response coefficient

元素 Element	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn
T_i	40	30	10	5	5	5	2	1

表5 潜在生态危害指数及 RI 分级标准

Table 5 Criteria for classification of potential ecological risk index and RI

E_i	RI	污染程度 Pollution degree
$E_i<40$	$RI\leq 110$	低潜在生态风险
$40\leq E_i<80$	$110<RI\leq 220$	中等潜在生态风险
$80\leq E_i<160$	$220<RI\leq 440$	中高等潜在生态风险
$160\leq E_i<320$	$440<RI\leq 880$	高等潜在风险
$E_i\geq 320$	$RI>880$	极高等潜在风险

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征分析

如图2所示,供试土壤pH范围为3.50~7.74,平均值为6.50,除WLG区土壤呈现出弱酸性外,80.72%的土壤样品呈近中性及弱碱性($\text{pH}>6.5$)。6个采样区土壤中Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr、Zn 8种重金属含量分布情况如图3。按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的重金属筛选值中pH分段之后得到,供试土壤均存在较高程度的重金属污染,其中Cd污染尤为严重,平均超标率达到95.24%;其次为As和Pb,平均超标率分别为53.33%和42.86%;Zn、Cu、Cr、Hg、Ni的超标率相对较低,平均分别为30.48%、26.67%、12.38%、6.67%、5.71%。与农用地土壤污染管控值相比,As、Cd、Pb分别平均超标24.76%、22.86%、11.43%;除了LL地区靠近铬渣堆放点的一个水田样点Cr严重超标外,Hg、Cr均低于管控值。

6个采样区域(ZY、LL、JJ、DT、SSL、WLG)土壤Cd平均含量分别为1.24、1.03、19.41、2.01、5.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明JJ、DT、SSL地区土壤受到了严重的外源Cd污染。土壤As含量超标主要集中于JJ、DT地区,平均含量分别为721.3、129.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超标率均为100%。本研究结果与曾民等^[17]、乔鹏炜等^[23]报道的DT矿区周边土壤Cd、As含量范围基本一致,但JJ地区土壤中Cd、As含量却远超曾民等^[17]对个旧193个耕层土壤样品的调查结果,分别为 (1.39 ± 1.30) 、 (122 ± 137) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能是因为本研究采样地区紧邻矿区,受到的污染程度更大。土壤Pb、Cu主要在JJ、DT、SSL地区超标,此3个地区土壤Pb平均含量为1 193.89、263.92、747.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超标率分别为

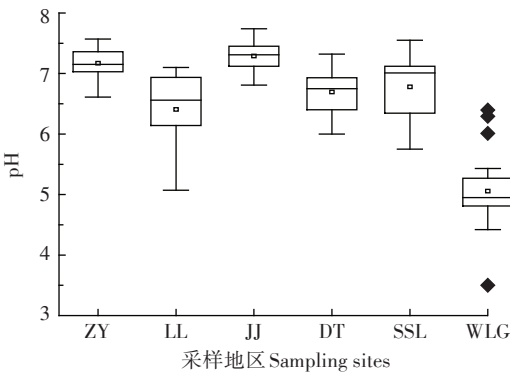
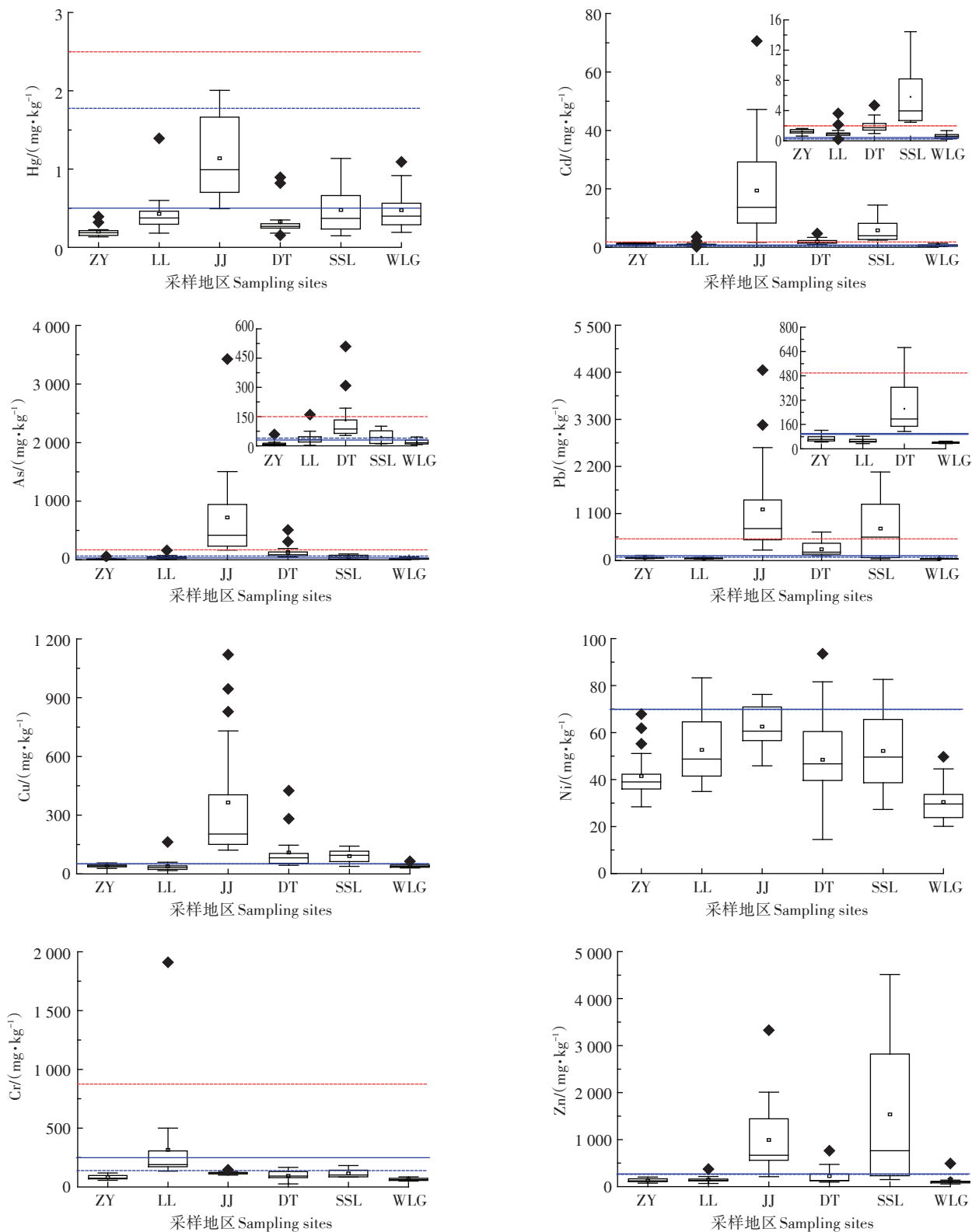


图2 各采样区土壤pH分布箱型图

Figure 2 Box plot of soil pH distribution in each sampling site



蓝色实线、虚线分别代表《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中水田和旱地土壤污染风险筛选值($\text{pH}=6.50$);红色虚线代表农田土壤污染风险管制值($\text{pH}=6.50$)

The blue solid line and dashed line represent the risk screening values of soil pollution for paddy fields and dry lands, respectively, according to national standard (GB 15618—2018) ($\text{pH}=6.50$). The red dashed line represents the risk control values of soil pollution for agricultural soil ($\text{pH}=6.50$)

图3 各采样区土壤Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr、Zn含量分布箱型图

Figure 3 Box plot of soil Hg, Cd, As, Pb, Cu, Ni, Cr, and Zn contents in each sampling site

100%、78%、63%,该土壤Pb含量与肖青青等^[24]、曾民等^[17]、马先杰等^[25]对JJ、DT、SSL矿区周边农田土壤Pb含量的报道相近,分别为1 185.5、133 mg·kg⁻¹和1 198.2 mg·kg⁻¹;Cu平均含量为364.69、109.21、91.22 mg·kg⁻¹,超标率分别为100%、78%、88%。土壤Zn主要在JJ、SSL地区超标,平均含量分别为992.52、1 536.36 mg·kg⁻¹,超标率均为100%。土壤Cr仅在LL地区存在显著超标情况,平均含量为315.5 mg·kg⁻¹,造成该地区土壤Cr含量异常的原因可能与2011年云南曲靖5 000 t铬渣非法堆放事件相关^[26]。土壤Hg超标仅在JJ地区表现十分明显,平均含量为1.14 mg·kg⁻¹,超标率为78.95%,需引起关注;剩余地区Hg平均含量均未超标。

2.2 土壤重金属单项污染指数和综合污染指数评价

表6中单项污染指数评价结果显示,调查区域内土壤重金属污染程度为Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni>Hg。珠江上游流域农田土壤普遍Cd污染严重,珠江源头ZY、LL地区和都柳江流域的WLG地区土壤Cd轻度至中度污染;南盘江中游JJ、DT地区和北盘江流域的SSL地区为重度Cd污染,其中JJ地区的Cd污染指数最高达到235.3,平均为50.8;这可能由地质高背景与工矿业三废排放复合原因导致^[27]。除Cd污染外,珠江源头LL地区土壤还受到轻微的As、Cr污染;

南盘江中游JJ地区和DT地区还存在不同程度的As、Pb、Cu等污染,其中JJ地区污染尤为严重,需要引起有关部门的高度重视;北盘江流域的SSL地区土壤中Pb、Zn也重度污染,可能与铅锌矿的开采有关。熊燕等^[27]研究中南盘江流域水系(云南段)沉积物中重金属污染特征与本研究农田土壤污染特征基本一致,其研究发现沉积物中重金属富集程度依次为Cd>As>Pb>Sb>Zn>Cu>Cr;上游曲靖段沉积物主要富集As、Cd、Cr,中游个旧段富集Cd、As、Sb,下游罗平段富集Cd、Sb,造成较高的潜在生态危害,并可能通过水体对珠江流域下游地区造成危害。此外,综合污染指数(表6)表明所有调查采样地区污染等级均为重度污染水平;6个采样地区综合污染指数为JJ>SSL>DT>LL>ZY>WLG;其中南盘江中游地区污染最为严重,JJ地区综合污染指数是安全线的239倍,污染问题不容忽视。这与熊燕等^[27]对南盘江流域水系(云南段)不同河段沉积物重金属污染程度研究结果一致,即中游(个旧)>上游(曲靖)>下游(罗平)。

2.3 土壤重金属潜在生态危害指数评价

土壤重金属潜在生态危害指数评价结果(表7)表明,6个采样地区RI表现为JJ>DT>SSL>LL>ZY>WLG。其中JJ地区的RI达到4 057,为极高等潜在风险水平,LL、DT、SSL地区为高等潜在风险水平,ZY、

表6 各采样区土壤重金属单项污染指数和综合污染指数评价结果

Table 6 Single factor pollution index and integrated pollution index of soil heavy metals in each sampling site

采样地区 Sampling sites	单项污染指数Single factor pollution index								综合污染指数 Integrated pollution index	污染评价 Pollution assessment
	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn		
ZY	0.19	3.22	0.42	0.53	0.42	0.40	0.35	0.51	3.86	重污染
LL	0.43	2.62	1.34	0.51	0.54	0.66	1.39	0.65	5.09	重污染
JJ	1.04	50.8	25.7	9.35	3.65	0.59	0.48	3.94	166.60	重污染
DT	0.25	5.75	4.08	2.35	1.55	0.56	0.48	0.98	11.14	重污染
SSL	0.21	18.5	1.48	6.84	1.19	0.57	0.62	6.56	34.17	重污染
WLG	0.61	2.07	0.55	0.53	0.82	0.50	0.36	0.59	3.21	重污染

表7 各采样区土壤重金属潜在生态危害指数评价结果

Table 7 Potential ecological risk index of soil heavy metals in each sampling site

采样地区	E_i								RI	污染评价
Sampling sites	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn		Pollution assessment
ZY	139.1	170.9	6.10	8.55	4.52	4.88	2.54	1.45	338.0	中高等
LL	295.3	141.7	21.39	6.61	4.18	6.19	9.68	1.65	486.7	高等
JJ	784.6	2 672.0	392.00	147.00	39.38	7.36	3.62	11.06	4 057.0	极高等
DT	225.8	277.1	70.35	32.50	11.79	5.70	2.93	2.48	628.6	高等
SSL	173.4	264.8	4.69	38.95	6.84	7.88	11.17	76.82	584.6	高等
WLG	173.1	28.3	2.01	2.12	3.07	4.60	6.27	5.87	225.3	中高等

WLG地区则为中高等潜在风险水平。Yang等^[28]、杨思林等^[29]对珠江上游南盘江曲靖段12个土壤样品进行重金属潜在生态风险分析得出,约58.3%的土壤样品存在低或中度潜在生态风险,其余样品均为高或极高潜在生态风险,这与本研究中珠江上游曲靖段的ZY、LL地区土壤重金属较高的潜在生态风险评价结果相吻合。从污染元素来看,除LL及WLG地区以外,Cd是土壤潜在生态危害指数最高的元素,为最主要的生态危害来源;其次为Hg,尤其在JJ地区土壤中表现出高潜在生态风险水平;As、Pb主要在JJ地区土壤样品中分别表现出中高、中等潜在生态风险水平;其他元素均表现为低潜在生态风险水平。

3 结论

(1)按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中重金属筛选值pH分段之后得到,珠江流域上游6个采样区土壤均存在重度重金属污染,其中Cd污染尤为严重,其次为As和Pb,Zn、Cu、Cr、Hg、Ni的超标率相对较低。与农用地土壤污染管控值相比,As、Cd、Pb分别超标24.76%、22.86%、11.43%。

(2)单项污染指数显示,调查区域土壤重金属污染程度呈现为Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni>Hg,其中Cd污染尤为严重。综合污染指数显示6个采样区土壤均为重度污染水平,污染程度为JJ>SSL>DT>LL>ZY>WLG,以南盘江中游个旧地区最为严重,可能会对周边水体、沉积物等造成环境危害。

(3)土壤重金属潜在生态危害指数结果表明,6个采样地区RI表现为JJ>DT>SSL>LL>ZY>WLG,其中JJ地区为极高等潜在风险,SSL、LL、DT地区为高等潜在风险,ZY及WLG地区则为中高等潜在风险水平。主要潜在生态危害元素为Cd和Hg,Hg在农田土壤中的富集需引起注意。

参考文献:

[1] 杨皓,范明毅,黄先飞,等.喀斯特山区燃煤型电厂周边农业土壤中重金属的污染特征及评价[J].生态环境学报,2016,25(5):893-902.
YANG Hao, FAN Ming-yi, HUANG Xian-fei, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metals in agricultural soils around coal-fired power plants in Karst mountainous area[J]. *Ecology and Environment Science*, 2016, 25(5):893-902.

[2] Zhang W P, Qian J, Xu G J, et al. Characterization and evaluation of heavy metal pollution in soil-wheat system around coal mines in Pingdingshan, China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(3):5435-5447.

[3] 冉继伟,宁平,孙鑫,等.云南个旧土壤农作物重金属污染特征及潜在风险[J].中国环境监测,2019,35(5):62-68.
RAN Ji-wei, NING Ping, SUN Xin, et al. Heavy metal pollution characteristics and potential risks of soil and crops in Gejiu, Yunnan[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(5):62-68.

[4] 周艳,陈楠,邓绍坡,等.西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科学,2018,39(6):2884-2892.
ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6):2884-2892.

[5] Liang J, Feng C, Zeng G, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225:681-690.

[6] Lalor G C. Review of cadmium transfers from soil to humans and its health effects in the Jamaican environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3):162-172.

[7] Rachwal M, Kardel K, Magiera T, et al. Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition[J]. *Geoderma*, 2017, 295:10-21.

[8] Liu R, Wang M, Chen W, et al. Spatial pattern of heavy metals accumulation risk in urban soils of Beijing and its influencing factors[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 210:174-181.

[9] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142:501-511.

[10] 刘意章,肖唐付,熊燕,等.西南高镉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 Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with high geochemical background of cadmium, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6):2877-2884.

[11] 杨思林.珠江上游沉积物与土壤金属元素地球化学特征研究[D].昆明:昆明理工大学,2014:10-11.
YANG Si-lin. Geochemical characteristics of metal elements in sediments and soils in the upstream of the Pearl River[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014:10-11.

[12] 王红英.陆良县重金属污染防治主要措施及成效[J].环境科学导刊,2017,36(增刊2):139-142.
WANG Hong-ying. Measures and effects of heavy metal pollution control in Luliang County[J]. *Environmental Science Survey*, 2017, 36(Suppl2):139-142.

[13] 骆永明,滕应.我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J].中国科学院院刊,2018,33(2):145-152.
LUO Yong-ming, TENG Ying. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):145-152.

[14] 宋波,王佛鹏,周浪,等.广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价[J].环境科学,2019,40(5):2443-2452.
SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, et al. Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5):

- 2443-2452.
- [15] 任治忠, 杨雪莲. 云南酸控区土壤重金属释放特征及潜在风险[J]. 环境保护科学, 2011, 37(6):29-32.
- REN Zhi-zhong, YANG Xue-lian. Release character and potential risks of heavy metals in soil of acid rain control zone, Yunnan Province[J]. *Environmental Protection Science*, 2011, 37(6):29-32.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land; GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [17] 曾民, 郭蓉, 杨树明, 等. 云南省个旧市农产品产地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 土壤与作物, 2019, 8(1):85-92.
- ZENG Min, GUO Rong, YANG Shu-ming, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in agricultural production areas: Taking Gejiu City of Yunnan Province as an example[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(1):85-92.
- [18] 李丁, 王济, 宣斌, 等. 贵阳南部近郊蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11):1362-1367.
- LI Ding, WANG Ji, XUAN Bin, et al. Heavy metal pollution and health risk evaluation of vegetables in southern suburbs of Guiyang, China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(11):1362-1367.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] 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, 1990:220-401.
- China National Environmental Monitoring Centre. Elemental background values of soils in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:220-401.
- [21] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 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 Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):1037-1044.
- [22] 侯千, 马建华, 王晓云, 等. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, 32(6):1764-1771.
- HOU Qian, MA Jian-hua, WANG Xiao-yun, et al. Bioavailability and potential ecological risk of soil heavy metals in kindergartens, Kaifeng City[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(6):1764-1771.
- [23] 乔鹏伟, 周小勇, 杨军, 等. 云南个旧锡矿区大屯盆地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 地质通报, 2014, 33(8):1253-1259.
- QIAO Peng-wei, ZHOU Xiao-yong, YANG Jun, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of Datun basin in the Gejiu tin mining area, Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8):1253-1259.
- [24] 肖青青, 王宏镡, 赵宾, 等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):271-281.
- XIAO Qing-qing, WANG Hong-bin, ZHAO Bin, et al. Heavy metal pollution in crops growing in suburb of Gejiu City, Yunnan Province, China: Present situation and health risk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):271-281.
- [25] 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 Xian-jie, LU Feng, CHEN Lan-lan, 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.
- [26] 吴满昌, 杨莉娟, 王嘎利. 云南铬渣污染与环境管理问题探讨: 中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 昆明: 中国环境科学学会, 2013.
- WU Man-chang, YANG Li-xian, WANG Ga-li. Chromium slag pollution and environmental management in Yunnan: Symposium of the annual conference of China Society for Environmental Sciences[C]. Kunming: China Society for Environmental Sciences, 2013.
- [27] 熊燕, 宁增平, 刘意章, 等. 南盘江流域(云南段)水系沉积物中重金属含量分布特征及其污染状况评价[J]. 地球与环境, 2017, 45(2):171-178.
- XIONG Yan, NING Zeng-ping, LIU Yi-zhang, et al. Distribution and pollution evaluation of heavy metals in sediments in the Nanpan River Basin (Yunnan Section)[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(2):171-178.
- [28] Yang S, Zhou D, Yu H, et al. Distribution and speciation of metals (Cu, Zn, Cd, and Pb) in agricultural and non-agricultural soils near a stream upriver from the Pearl River, China[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 177:64-70.
- [29] 杨思林, 赵宁, 王大伟, 等. 南盘江曲靖段沉积物与农田土壤重金属的污染评价[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(1):153-155.
- YANG Si-lin, ZHAO Ning, WANG Da-wei, et al. Heavy metals pollution assessment in sediments and agricultural soils of Qujing section of Nanpan River[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(1):153-155.