

刘瑞雪, 乔冬云, 王 萍, 等. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1523–1530.

LIU Rui-xue, QIAO Dong-yun, WANG Ping, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils located in Xiangtan County in Hunan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1523–1530.

湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价

刘瑞雪¹, 乔冬云², 王 萍³, 安 毅¹, 霍莉莉^{1*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 吉林省农业环境保护与农村能源管理总站, 长春 130021; 3. 贵州省农业资源环境管理站, 贵阳 550001)

摘 要:为探讨湘潭县农田土壤重金属的污染特征及潜在生态风险,以湘潭县农田土壤为研究对象,分析了土壤中As、Hg、Zn、Pb、Cu、Cr、Cd、Ni 8种重金属元素含量和污染特征,并利用潜在生态危害指数法评价了该区域农田中土壤重金属的综合潜在生态风险。结果表明:8种重金属中Cd含量平均值高于风险筛选值,低于风险管制值,其他7种重金属含量的平均值均低于风险筛选值,且Cd和Hg累积程度较高,其最小值分别是背景值的1.53倍和1.04倍。在单项污染风险评价中,超过90%的样本Cr、As、Hg、Pb含量小于风险筛选值,90.4%的样本Cd含量大于风险筛选值,且Cd含量高的区域主要分布在东部地区,没有Cr、As、Hg、Pb和Cd含量大于风险管制值的样本;综合污染风险评价结果显示92%的样本可能存在食用农产品不符合质量安全标准等的土壤污染风险。综合潜在生态风险系数的平均值为314.9,处于强潜在生态风险水平。通过以上分析说明,该区农田土壤重金属整体呈现出高生态风险状态,这种现象主要是由该区农田土壤中Cd的污染程度比较高造成的。

关键词:湘潭县;农田土壤;重金属;污染特征;生态风险

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)07-1523-08 doi:10.11654/jaes.2018-1491

Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils located in Xiangtan County in Hunan Province, China

LIU Rui-xue¹, QIAO Dong-yun², WANG Ping³, AN Yi¹, HUO Li-li^{1*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Agricultural Environmental Protection and Rural Energy Management Station in Jilin Province, Changchun 130021, China; 3. Agricultural Resources and Environmental Management Station in Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: To characterize the pollution and potential ecological risk from heavy metals in soil of farmland in Xiangtan County, eight heavy metals (As, Hg, Zn, Pb, Cu, Cr, Cd, and Ni) were analyzed and evaluated, using the Potential Ecological Hazard Index. Based on the Soil Environmental Quality Risk Control Standards for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618—2018), we found that only Cd concentration (mean value) exceeded the risk screening value (RSV) among all the soil heavy metals in the study region. Cd and Hg showed high accumulation, and the minimum Cd and Hg concentration was 1.53 times and 1.04 times that of the local background values, respectively. With regards to single index evaluations, the proportion of samples with concentrations of Cr, As, Hg and Pb lower than the RSV was more than 90%. In most samples, Cd concentration was higher than RSV. The high Cd concentration occurred in the eastern region. No samples with heavy metals concentrations higher than the risk intervention value (RIV) were found. The results of this comprehensive evaluation indicate that 92% of the samples may have soil pollution risks, and edible agricultural products may not be meeting quality and safety standards. The soil pollution in this county should be attributed to Cd pollution. Furthermore, the average of the potential ecological risk factor is 314.9 in this area, which indicates a high level of potential risk, mainly due to the high levels of Cd contamination.

Keywords: Xiangtan County; farmland soil; heavy metals; pollution characteristics; ecological risk

收稿日期: 2018-11-29 录用日期: 2019-02-22

作者简介: 刘瑞雪(1993—),女,河南周口人,硕士研究生,从事土壤污染与修复研究。E-mail: wslrx1225@126.com

*通信作者: 霍莉莉 E-mail: huoliliforgood@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41501102); 中国农业科学院创新工程(2018-cxgc-lyj); 农业行业科研专项(201403014)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41501102); Innovation Project of CAAS(2018-cxgc-lyj); Science & Technology Project of Industry(Agriculture)(201403014)

土壤资源是人类赖以生存的重要基础,其质量直接影响到人类健康、农产品品质和土壤环境^[1]。受工业“三废”、城市生活、农用化学品投入等多种因素影响,导致土壤重金属含量增加,其污染已经成为全球性问题^[2-3]。土壤重金属污染具有富集性、持久性和隐蔽性特征,并通过食物链危害人体健康,其生态风险危害不可小觑。2016年国家出台《土壤污染防治行动计划》,即“土十条”,土十条明确要求摸清农产品产地污染底数,掌握土壤环境质量状况,并在此基础上进行土壤污染风险管控,做到对农产品产地分级分区分类科学管理。鉴于此,2018年8月生态环境部发布了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),新标准直接针对农用地土壤污染风险管控给出风险筛选值和管制值及其使用描述,相比以往评价标准具有其先进性和现实意义。

目前,国内外学者对土壤重金属污染评价的研究主要集中在污染程度评价、风险评估、重金属污染对人体健康的影响、重金属污染空间分布特征及污染源解析方面^[4-5]。例如,邹素敏等^[6]运用单因子污染指数法和综合污染指数法对不同品种蔬菜重金属进行了污染评价;Hossain等^[7]采用地累积指数法和多元统计法分析马来西亚 Gebeng 工业城的土壤重金属空间分布及来源;Santos-Francés 等^[8]采用地累积指数,改进的内梅罗指数和潜在的生态风险指数对秘鲁两个地区的污染程度及风险进行评价;金晓丹等^[9]运用 Lars Hakason 潜在生态风险指数评价法对广西某铅锌矿区的土壤重金属进行健康风险评估。随着国家精准农业的开展,土壤特性空间变异地统计学和地理信息(GIS)的研究方法与手段得到进一步发展,主要表现为 GIS 与地统计学的有效结合,揭示重金属空间分布特征和规律性^[10],为土壤重金属污染的综合评价和治理提供科学支持。例如,Benhaddya 等^[11]利用 GIS 技术研究了阿尔及利亚表层土壤重金属污染空间分布特征;Zhou 等^[12]结合 GIS,多元分析中国东部某废弃工业区土壤中重金属的来源。

风险评估是研究污染物质生态危害的重要手段,常用的研究方法包括阈值比较法、概率风险评估法、风险评估编码法和潜在生态危害指数法。阈值比较法使用方便,但忽视了污染物在环境中的变异及耐受能力差异;概率风险评估法考虑了生物的耐受性和污染物浓度的变异,但不能明确区分哪类物种具有较大风险;风险评估编码法是利用形态分析研究风险,根据重金属的可交换态和碳酸盐结合态总量的比值确

定风险大小;潜在生态危害指数法是 Lars Hakanson 于 1980 年应用沉积学原理评价重金属生态危害的方法,不仅反映某一环境中不同污染物的影响,也反映了多种污染物的综合影响,并定量地划分潜在危害程度,是国际上应用较广泛的评价方法。

湖南省是我国产粮大省,稻谷产量常年稳居全国第一^[13]。2013 年 5 月湖南“镉大米”事件引发人们对农产品安全和土壤重金属污染的关注。湘潭县地处湘江下游,是重要的有色金属产区,也是重要的水稻产区。以往对该区农田重金属污染的整体状况研究较少,大多针对某个元素或局部小区域,且采用的评价标准和方法均是依据已废止的《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)。本研究针对我国目前产地风险管控问题,选用 GB 15618—2018 对湘潭县农田土壤中 Hg、Cd、Pb、Cu、As、Cr、Zn、Ni 八种重金属的整体污染特征及分布状况进行了研究,并采用潜在生态危害指数法评价潜在生态风险,旨在探明该地区重金属污染整体状况、分布及其风险,为该地区农产品产地污染防治、风险管控及产地安全管理提供科学依据,对该地区的农产品产地和农产品质量安全以及农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湘潭县位于北纬 27°20′~28°05′、东经 112°25′~113°03′,属亚热带季风湿润气候,年平均气温 16.7~18.3℃。1 月最冷,月平均气温在 5℃左右。7 月最热,月平均气温在 30℃左右,极端高温达 41.2℃,冬夏温差 24~25℃。区内土壤类型主要为红壤、潮土和黏土。农作物一般为一年两熟,主要农作物为水稻。该区金属矿分布广泛,是湖南重要的矿业和重工业基地。

1.2 样品采集与处理

样品采集于 2016 年 10 月。按随机布点方法进行采样,采样时远离公路、田埂、肥堆等区域,用木铲取 0~20 cm 的耕层土壤,并用 GPS 精准定位,共采集了 125 个土壤样品。将采集后的样品置于室内自然风干,掰碎,并剔除大石块、植物根系等杂质,分别用四分法取适量土样研磨过 100、20 目尼龙筛后装密封袋备用。

1.3 样品分析

使用酸度计测定 pH 值。用重铬酸钾容量法测量有机质,容量法测量阳离子交换量^[14],土壤重金属测试时,准确称取 0.1~0.25 g 土壤样品至微波消解罐中,

加入6 mL 65%的HNO₃(优级纯,Merck)、1 mL 30%的H₂O₂(优级纯,国药)和1 mL 40%的HF(优级纯,国药),放入微波消解仪进行消解,消解液过滤待测。用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,Agilent)同时测定As、Hg、Zn、Pb、Cu、Cr、Cd和Ni,具体方法参照参考文献[15]。

1.4 污染评价标准

依据GB 15618—2018给出的标准值和评价方法对土壤重金属单项和综合污染风险进行评价。由于标准中有些农用地土壤重金属的管制值未给出,所以本文中只讨论标准中给出管制值的五种重金属的单项和综合污染风险。土壤重金属单项和综合污染风险评价分级标准见表1和表2。

1.5 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法^[16]不仅考虑土壤重金属含量,而且综合考虑了多元素协同作用、毒性水平、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素,因此在环境风险评价中得到了广泛应用^[17]。计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_{\text{表层}}^i}{C_n^i} \tag{1}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{2}$$

式中: $C_{\text{表层}}^i$ 为第*i*种重金属的实际测量含量,mg·kg⁻¹; C_n^i 为第*i*种重金属的参比值,mg·kg⁻¹,本研究选用湖南省土壤平均背景值; T_r^i 为第*i*种重金属的毒性响应系数,Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb的毒性响应系数分别为2、5、5、1、10、30、40、5^[16,18]; E_r^i 为第*i*种重金属的单项潜在风险系数, RI 为综合潜在风险系数,重金

属潜在生态风险程度评价指标与分级关系见表3^[17]。

1.6 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 20.0对数据进行描述性统计分析;重金属污染空间分布特征采用ArcGIS 10.3中地统计模块进行地统计分析并制图。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属污染评价

2.1.1 土壤重金属含量统计

由表4可知,研究区内125个样本点中,土壤pH值的范围为4.40~7.80,平均值为5.57,整体属酸性土壤;有机质和阳离子交换量的范围分别为24.8~71.1 g·kg⁻¹和8.05~19.88 cmol·kg⁻¹,平均值分别为44.44 g·kg⁻¹和12.8 cmol·kg⁻¹。125个样本点的Cd和Hg累积

表3 重金属潜在生态风险程度评价指标与分级关系
Table 3 Evaluation index and classification relationship of potential ecological risk degree of heavy metals

潜在生态风险 Potential ecological risk	范围 Range	潜在风险程度 Potential risk level
E_r^i	$E_r^i < 40$	轻微
	$40 \leq E_r^i < 80$	中度
	$80 \leq E_r^i < 160$	强
	$160 \leq E_r^i < 320$	很强
	$E_r^i \geq 320$	极强
RI	$RI < 150$	轻微
	$150 \leq RI < 300$	中度
	$300 \leq RI < 600$	强
	$RI \geq 600$	很强

表1 土壤重金属单项污染风险评价分级标准

Table 1 Classification criteria for single-site pollution risk assessment of heavy metals in soil

污染风险等级 Pollution risk level	单项重金属含量(X) Single heavy metal content(X)	污染风险等级特征描述 Description of pollution risk level
1	$X \leq$ 风险筛选值	农用地土壤污染风险低,一般情况下可以忽略
2	风险筛选值 $< X \leq$ 风险管制值	可能存在食用农产品不符合质量安全标准等土壤污染风险
3	$X >$ 风险管制值	食用农产品不符合质量安全标准等农用地土壤污染风险高,且难以通过安全利用措施降低食用农产品不符合质量安全标准等农用地土壤污染风险

表2 土壤重金属综合污染风险评价分级标准

Table 2 Classification criteria for soil heavy metal comprehensive pollution risk assessment

污染风险等级 Pollution risk level	综合污染风险 Integrated pollution risk	污染风险等级特征描述 Description of pollution risk level
1	{Y1,Y2...Y8}max=1	农用地土壤污染风险低,一般情况下可以忽略
2	{Y1,Y2...Y8}max=2	可能存在食用农产品不符合质量安全标准等土壤污染风险
3	{Y1,Y2...Y8}max=3	食用农产品不符合质量安全标准等农用地土壤污染风险高,且难以通过安全利用措施降低食用农产品不符合质量安全标准等农用地土壤污染风险

注:Y1~Y8分别为8种重金属的单项污染风险评价级数。
Note: Y1~Y8 are the single pollution risk assessment level of 8 heavy metals.

表4 农田土壤重金属含量统计($n=125$)
Table 4 Statistics on soil heavy metal content in farmland($n=125$)

项目 Item	最小值 Minimum value/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 Maximum value/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术平均数 Arithmetic mean/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 Standard deviation/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 Coefficient of variation/%	湖南省土壤平均背景值 ^[19] Average background value of soil in Hunan Province/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cr	6.40	185	70.4	27.7	39.3	68
Ni	6.60	68.0	26.4	7.77	29.4	32
Cu	9.10	78.0	25.0	9.32	37.3	26
Zn	29.0	215	78.4	25.1	32.0	94
As	0.25	37.0	14.5	5.40	37.2	14
Cd	0.13	1.70	0.58	0.29	50.0	0.085
Hg	0.10	0.77	0.19	0.10	52.6	0.096
Pb	22.0	88.0	45.0	12.3	27.3	27
pH	4.40	7.80	5.57	0.68	12.2	—
CEC	8.05	19.88	12.8	2.47	19.3	—
有机质	24.8	71.1	44.44	8.71	19.6	—

注:pH无单位,CEC的单位为 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质的单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。
Notes:pH is unitless, the unit of CEC is $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the unit of organic matter is $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

指数均大于1,且其最小值分别是背景值的1.53倍和1.04倍;Pb、As、Cr、Cu、Zn和Ni累积指数大于1的样本点占全部样本的比例分别为99.2%、46.4%、40.0%、28.8%、16.8%和12.0%^[18-19],该区农田土壤中Cd和Hg累积程度较高。Cr、As、Hg、Pb、Ni、Cu、Zn 7种元素含量的平均值均低于土壤污染风险筛选值,Cd含量的平均值高于土壤污染风险筛选值,但低于管制值。这与Lei等^[20]和Wang等^[21]的研究结果一致:该区土壤Cd污染较严重。除此之外,与国内其他相关研究^[22-23]对比,该区的土壤Cd也是高于其他地区,因此,在该区从事生产活动时,应重视由土壤Cd污染带来的生态风险。

变异系数常用来反映农田重金属含量的变化^[24],变异系数在10%~30%之间属于中等变异,>30%属于强变异^[22]。由表4可知,Ni、Pb属于中等变异水平,Cr、Cu、Zn、As、Cd、Hg属于强变异水平,并且有很大的含量范围,说明该区土壤重金属含量分布不均匀,这种现象大多是由人类活动引起的,比如污灌、施肥等农业生产活动^[25-27]。其中Hg最为显著。

2.1.2 土壤重金属含量分布

利用克里金插值法对样本点进行插值,得到8种土壤重金属含量的空间分布特征和规律。由图1可知,Cr、Ni、Cu有相似的空间分布,Cr和Ni含量高的区域均出现在南部,Cu含量高的地方除了大部分出现在南部,还有一小部分出现在北部。这表明Cr、Ni、Cu的来源有相同的地方。据调查,在Cr、Ni、Cu含量高的地区周围有化工厂、矿区和养殖场,养殖场是Cu

的重要来源^[28-29],Cr、Ni、Cu高值区的形成也与厂矿在该区域的分布有关。

Zn、Cd、Pb的空间分布也是相似的,高含量区域主要出现在东部,Cd的分布规律呈现出从西南到东北逐渐增大的趋势;东部地区是污染源分布最多的区域,有养殖场、皮革厂、采矿业、化工厂和食品加工厂。养殖场中动物粪便的排放是Zn的重要来源^[28-29],矿业的开采、化工厂污水的排放、养殖场动物粪便的排放和食品加工厂生产加工、储藏运输的过程都能产生大量的Cd、Pb。除此之外,农业活动中磷肥的不当施用也是Cd的重要来源^[30]。

As和Hg两种元素含量高的区域分布比较广泛,其中As在东部地区有小部分区域含量比较高,Hg的高含量区域主要在中部地区。产生这一现象的原因除了与周围的厂矿有关外,也可能与污灌有关^[31]。

2.1.3 土壤重金属单项污染风险评价

由表5可知,125个样本中,超过90%的样本Cr、As、Hg、Pb污染风险处于1级水平,即其含量小于等于风险筛选值,表明这四种重金属对农产品质量安全、农作物或生态环境的风险低,一般情况下可以忽略;有不到10%的样本处于2级水平,即其含量大于风险筛选值,小于风险管制值,可能存在农产品不符合质量安全标准等土壤风险,原则上应当采取农艺调控、替代种植等安全利用措施进行风险管控。Cr、As、Hg、Cd和Pb 5种重金属没有超过风险管制值的样本,污染程度均未达到3级,但90.4%的样本Cd污染风险处于2级水平。Cd含量明显高于其他重金

属,这可能是受到工矿企业的影响,从而出现Cd污染现象^[23]。

2.1.4 土壤重金属综合污染风险评价

由表6可知,在综合污染风险评价中,处于1、2、3

级水平的样本比例分别为8.0%、92.0%、0,说明该区大部分农田存在土壤污染风险,根据上文土壤重金属单项污染风险评价结果,该区农田土壤重金属污染风险主要是因为Cd的污染程度比较高,在综合评价中

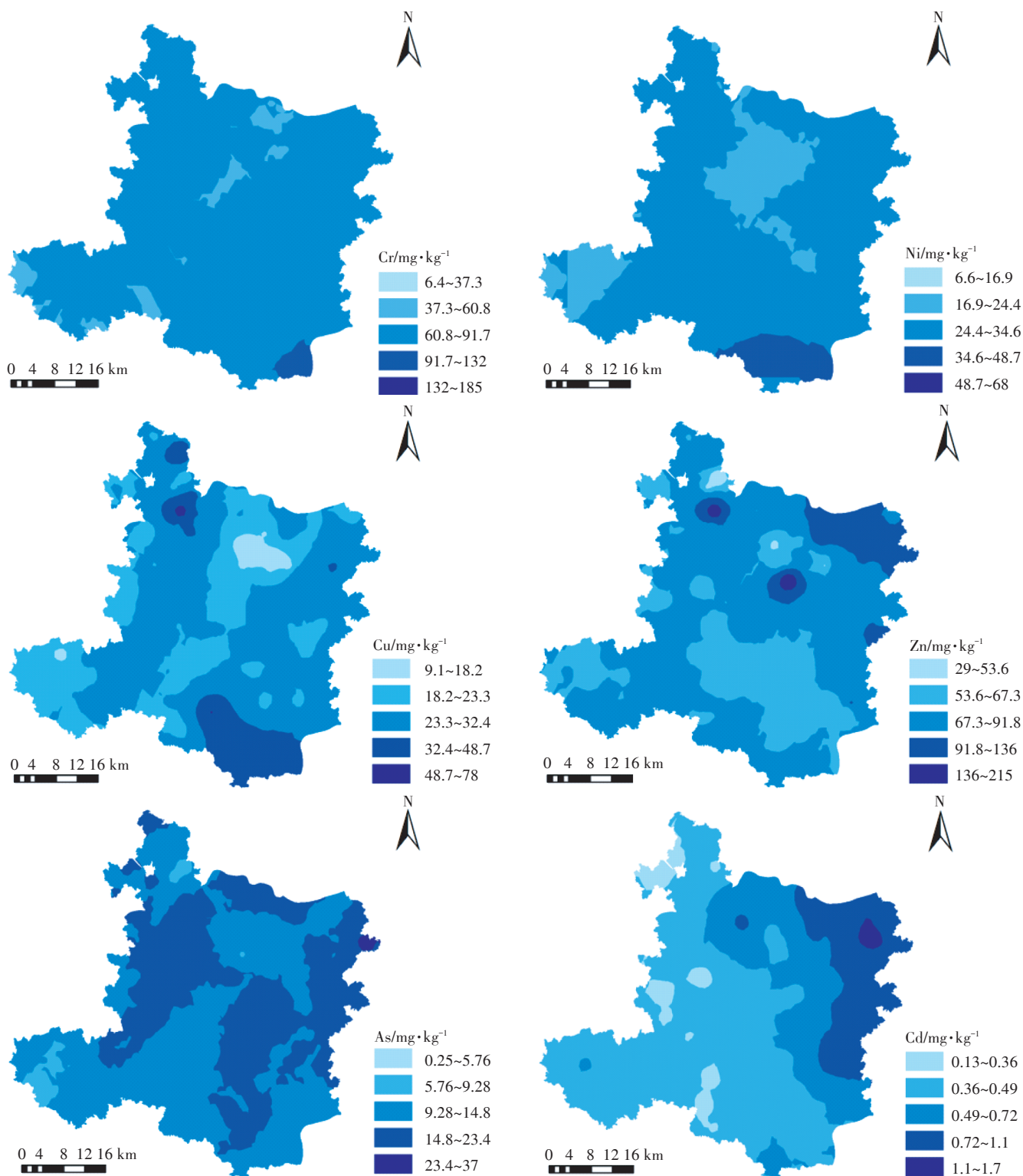
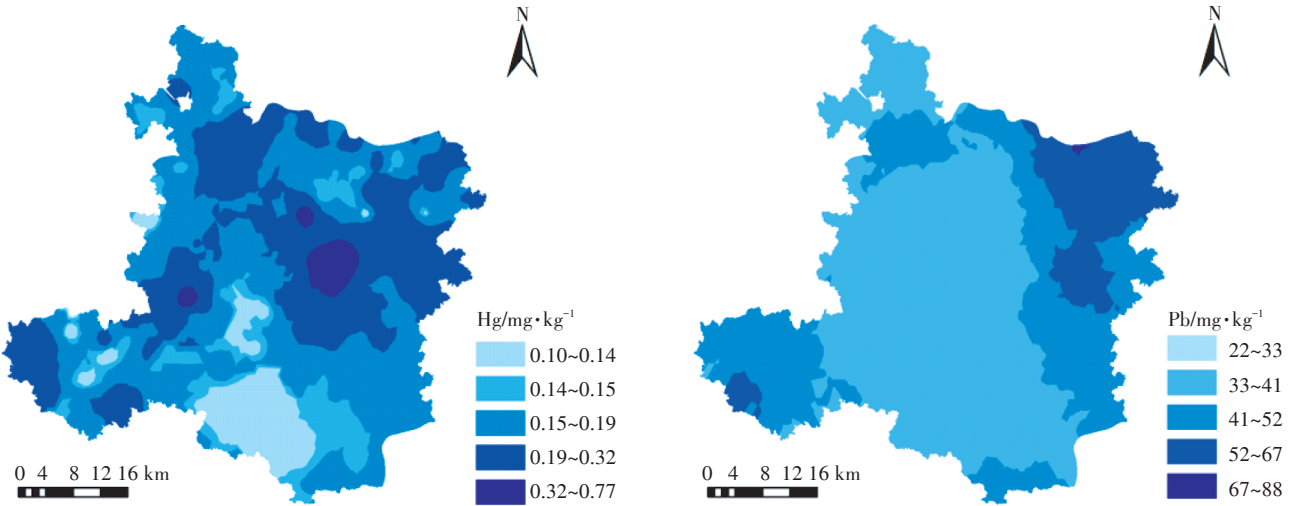


图1 研究区土壤重金属含量空间分布

Figure 1 Spatial distribution of soil heavy metal content in the study area



续图1 研究区土壤重金属含量空间分布
Continued figure 1 Spatial distribution of soil heavy metal content in the study area

表5 土壤重金属单项污染风险评价
Table 5 Soil heavy metal single pollution risk assessment

元素 Element	样本数 Number of samples	单项污染风险等级样本数 Number of single pollution risk grades			各污染风险等级样本所占比例/% Proportion of samples of various pollution risk levels		
		1	2	3	1	2	3
Cr	125	123	2	0	98.4	1.6	0
As	125	122	3	0	97.6	2.4	0
Cd	125	12	113	0	9.6	90.4	0
Hg	125	122	3	0	97.6	2.4	0
Pb	125	118	7	0	94.4	5.6	0

表6 土壤重金属综合污染风险评价($n=125$)
Table 6 Soil heavy metal comprehensive pollution risk assessment($n=125$)

综合污染风险等级 Comprehensive pollution risk level	样本数 Number of samples	各污染风险等级样本所占比例 Proportion of samples of various pollution risk levels/%
1	10	8.0
2	115	92.0
3	0	0

起主导作用。依据综合污染风险评价结果,该区原则上应当采取农艺调控、替代种植等安全利用措施进行风险管控,以达到农产品安全生产的目的。

2.2 土壤重金属潜在生态风险评价

土壤重金属可通过食物链进入人体,间接威胁人类健康,因此对农田土壤重金属潜在风险进行评价至关重要^[32-33]。如表7所示,该区土壤中Cr、Ni、Cu、Zn、As和Pb 6种元素的潜在生态风险系数 E_i 的平均值和最大值均小于40,属于轻微生态风险,Hg处于中度生态风险,Cd的潜在生态风险最高,处于很强的水平;在研究的125个样本中,Cd处于很强风险水平和强风

险水平的样本最多,所占比例分别为46%和40%,Hg处于中度风险水平的样本最多、其次是强风险水平,样本所占比例分别为70%和26%。说明研究区域农田土壤重金属中,Cd和Hg的污染最为严重,特别是Cd元素,应当采取一定的措施进行修复。综合潜在风险指数 RI 显示,整体上处于中度生态风险水平和强生态水平的样本数最多,分别占56%和40%,综合潜在风险指数的平均值为314.9,属于强生态风险,结合上文分析结果表明,该区的综合潜在风险程度主要受Cd污染的影响。

3 结论

(1)湘潭县农田土壤中Cd含量的平均值高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的土壤污染风险筛选值,其他7种重金属Cr、As、Hg、Pb、Ni、Cu、Zn含量的平均值低于筛选值,Cd污染严重,且Cd高含量区域主要分布在东部地区;Cd和Hg的最小值分别是背景值的1.53倍和1.04倍,累积程度较高。

表7 土壤重金属潜在生态风险因子及潜在风险指数

Table 7 Potential ecological risk factors and potential risk index of soil heavy metals

元素 Element	项目 Project					各风险等级样本所占比例 Sample proportion of each risk level/%				
	最小值 Minimum value/ mg·kg ⁻¹	最大值 Maximum value/ mg·kg ⁻¹	平均数 Average/ mg·kg ⁻¹	标准差 Standard deviation/mg·kg ⁻¹	变异系数 Coefficient of variation/%	轻微 Slight	中度 Moderate	强 Strong	很强 Very strong	极强 Pole-strength
E_r^i (Cr)	0.2	5.4	2.1	0.8	38.1	100	0	0	0	0
E_r^i (Ni)	1.0	10.6	4.1	1.2	29.3	100	0	0	0	0
E_r^i (Cu)	1.8	15	4.8	1.8	37.5	100	0	0	0	0
E_r^i (Zn)	0.3	2.3	0.8	0.3	37.5	100	0	0	0	0
E_r^i (As)	0.2	26.4	10.4	3.9	37.5	100	0	0	0	0
E_r^i (Cd)	45.9	600	204.9	101.3	49.4	0	1	40	46	14
E_r^i (Hg)	41.7	320.8	79.5	40.8	51.3	0	70	26	3	1
E_r^i (Pb)	4.1	16.3	8.3	2.3	27.7	100	0	0	0	0
RI	145.8	707.1	314.9	112.5	35.7	1	56	40	3	—

(2)在研究的125个样本中,超过90%的样本Cr、As、Hg、Pb单项污染风险处于1级水平,90.4%的样本Cd含量处于2级水平。Cr、As、Hg、Pb和Cd含量均未超过风险管制值。在综合污染风险评价中,处于1、2、3级水平的样本比例分别为8.0%、92.0%、0,该区大部分农田存在土壤污染风险,这种现象主要是由该区农田土壤中Cd的污染程度比较高造成的。

(3)该区农田土壤重金属的综合潜在生态风险系数(RI)的均值为314.9,属于强生态风险水平,其中Cd的生态风险在很大程度上决定了综合潜在生态风险的等级,因此,该区应严格控制Cd污染来源,着重加强土壤Cd污染治理。

参考文献:

- [1] Legaz B V, Souza D M D, Teixeira R F M, et al. Soil quality, properties, and functions in life cycle assessment: An evaluation of models[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140(2):502-515.
- [2] Fatoba P O, Ogunkunle C O, Folarin O O, et al. Heavy metal pollution and ecological geochemistry of soil impacted by activities of oil industry in the Niger Delta, Nigeria[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4):1-9.
- [3] Phoungthong K, Xia Y, Zhang H, et al. Leaching toxicity characteristics of municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, 10(2):399-411.
- [4] Li Z Y, Ma Z W, Van der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469(6):843-853.
- [5] Kumar V, Sharma A, Minakshi, et al. Temporal distribution, source apportionment, and pollution assessment of metals in the sediments of Beas river, India[J]. *Human & Ecological Risk Assessment*, 2018, 24(8):1-20.
- [6] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4):714-720.
- [7] ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Evaluation and enrichment characteristics of heavy metal pollution in different varieties of vegetables[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 26(4):714-720.
- [8] Hossain M A, Ali N M, Islam M S, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soils of Gebeng industrial city, Malaysia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(1):115-126.
- [9] Santos-Francés F, Martínez-Graña A, Alonso Rojo P, et al. Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the Andes Mountain Range (Cajamarca-Huancavelica, Peru)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(8):859.
- [10] 金晓丹, 马华菊, 廖俊鸿, 等. 广西某铅锌矿区土壤重金属污染生态和健康风险特征[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(1):124-131.
- [11] JIN Xiao-dan, MA Hua-ju, LIAO Jun-hong, et al. Ecological and health risk characteristics of heavy metal pollution in a lead-zinc mining area in Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(1):124-131.
- [12] 陈玉东, 王火焰, 周健民, 等. 黑龙江省海伦市农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *土壤*, 2012, 44(4):613-620.
- [13] CHEN Yu-dong, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min, et al. Heavy metals distribution characteristics and pollution assessment in farmland soils of Hailun City, Heilongjiang Province[J]. *Soils*, 2012, 44(4):613-620.
- [14] Benhaddya M L, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(3):1473-1486.
- [15] Zhou J, Feng K, Pei Z, et al. Multivariate analysis combined with GIS to source identification of heavy metals in soils around an abandoned industrial area, Eastern China[J]. *Ecotoxicology*, 2016, 25(2):380-388.
- [16] 周艳华, 黄卫, 李涛. 应对湖南省稻米重金属污染的技术对策研究[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(5):84-86.
- [17] ZHOU Yan-hua, HUANG Wei, LI Tao. Technical countermeasures for dealing with heavy metal pollution of rice in Hunan Province[J].

- Food and Oil*, 2018, 31(5):84-86.
- [14] 杨海君, 张海涛, 许云海, 等. 长株潭地区集中式饮用水水源地周边土壤环境质量监测与评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):150-156.
- YANG Hai-jun, ZHANG Hai-tao, XU Yun-hai, et al. Monitoring and evaluation of soil environmental quality around the concentrated drinking water source in Changsha-Xiangtan area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3):150-156.
- [15] 吴永盛, 徐金龙, 庄姜云, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法同时测定土壤中8种重金属元素[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(4):16-20.
- WU Yong-sheng, XU Jin-long, ZHUANG Jiang-yun, et al. Simultaneous determination of eight heavy metal elements in soil by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2017, 7(4):16-20.
- [16] Larks Hakanson I. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(2):975-1001.
- [17] 王 斌, 张 震. 天津近郊农田土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2012, 28(3):23-27.
- WANG Bin, ZHANG Zhen. Heavy metal pollution characteristics and potential ecological risk assessment of farmland soils in Tianjin Suburbs[J]. *China Environmental Monitoring*, 2012, 28(3):23-27.
- [18] 中国环境监测总站. 土壤环境监测技术规范 HJ/T 166—2004[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- China National Environmental Monitoring Centre. The technical specification for soil environmental monitoring: HJ/T 166—2004[S]. Beijing: China Environmental Press, 2004.
- [19] 潘佑民. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- PAN You-min. Soil background values and research methods in Hunan Province[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988.
- [20] Lei M, Tie B Q, Song Z G, et al. Heavy metal pollution and potential health risk assessment of white rice around mine areas in Hunan Province, China[J]. *Food Security*, 2015, 7(1):45-54.
- [21] Wang M, Chen W, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China [J]. *Chemosphere*, 2016, 144:346-351.
- [22] 湛天丽, 黄 阳, 滕 应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, 48(2):474-480.
- ZHAN Tian-li, HUANG Yang, TENG Ying, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in a farmland soil in Wanshan mercury mining area, Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2):474-480.
- [23] 曾妍妍, 周金龙, 王松涛, 等. 新疆若羌县农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9):87-91.
- ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, WANG Song-tao, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Ruoqiang County, Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(9):87-91.
- [24] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 等. 河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2139-2146.
- ZHANG Li-hong, XU Hui-zhen, YU Qing-chun, et al. Heavy metal pollution status and analysis and evaluation of farmland soils and crops in Qingyuan County of Hebei Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2139-2146.
- [25] 于 洋, 高宏超, 马俊花, 等. 密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价[J]. 环境科学, 2013, 34(9):3572-3577.
- YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, et al. Analysis and evaluation of heavy metals along the Chaohe River in Miyun County[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9):3572-3577.
- [26] 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 李建涛, 等. 焉耆盆地土壤重金属的污染及潜在风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6):1523-1530.
- HAMID Yimit, ZULPIYA Mamat, LI Jian-tao, et al. Sources explanation, pollution and assessment of potential ecological hazards of heavy metals in the soils of Yanqi Basin, China[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6):1523-1530.
- [27] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 300(1/2/3):229-243.
- [28] Nichohon F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metal inputs to agricultural soil in England and Wales[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311:205-219.
- [29] Yuan Y, Zeng G, Liang J, et al. Variation of water level in Dongting Lake over a 50-year period: Implications for the impacts of anthropogenic and climatic factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525:450-456.
- [30] Huang B, Shi X, Yu D, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(4):391-402.
- [31] 陈洪刚. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险研究[J]. 世界有色金属, 2016, 15:148-149.
- CHEN Hong-gang. Heavy metal pollution and potential environmental risks in long-term sewage irrigation farmland soils[J]. *World Non-ferrous Metals*, 2016, 15:148-149.
- [32] 刘丽琼, 魏世强, 江 韬. 三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7):1204-1211.
- LIU Li-qiong, WEI Shi-qiang, JIANG Tao. Distribution of soil heavy metals from water-level-fluctuating zone in Three-Gorge Reservoir Area and their evaluation of potential ecological risk[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(7):1204-1211.
- [33] Li Q S, Cai S S, Mo C H, et al. Toxic effects of heavy metals and their accumulation in vegetables grown in a saline soil[J]. *Environmental Safety*, 2010, 73(1):84-88.