

岳蛟, 叶明亮, 杨梦丽, 等. 安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 53-61.

YUE jiao, YE ming-liang, YANG Meng-li, et al. Evaluation of heavy metal pollution of farmland soil and agricultural products in a city of Anhui Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 53-61.

安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染评价

岳蛟, 叶明亮, 杨梦丽, 崔俊义, 马友华*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要:为评价安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染水平,在研究区内共布设1933个点位,采集土壤样品并在污染农田中采集43个农产品样品,对其与土壤进行一对一检测,分析研究Cr、Pb、Cd、As和Hg 5种重金属含量,对研究区农田土壤重金属含量水平、空间分布特征以及农产品重金属含量与土壤性质的关系进行分析。结果表明:研究区农田土壤中Cr、Pb、Cd、As和Hg的平均含量分别为62.5、32.6、0.209、8.85、0.080 mg·kg⁻¹,点位超标率分别为0.05%、0、14.59%、0.67%和1.97%。根据单因子污染指数法评价研究区农田土壤污染情况,5种元素污染程度Cd>Hg>As>Pb>Cr,从内梅罗综合污染指数来看,所有点位中清洁的占78.58%,综合生态风险指数法评价结果显示研究区基本处于轻微生态危害水平。农产品中Cr、Pb、Cd和As 4种重金属元素都是在偏酸性的土壤上富集系数较大,而Hg在偏碱性土壤上富集能力较强。

关键词:农田土壤;农产品;重金属;污染评价

中图分类号:X53;S19

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)01-0053-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0336

Evaluation of heavy metal pollution of farmland soil and agricultural products in a city of Anhui Province, China

YUE jiao, YE ming-liang, YANG Meng-li, CUI Jun-yi, MA You-hua*

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Heifei 230036, China)

Abstract: To explore the relationship between soil and agricultural products of heavy metals, total 1933 soil samples and 43 samples of agricultural products were collected from contaminated farmland in a city of Anhui Province. Heavy metal contents of Cr, Pb, Cd, Hg and As, spatial distribution characteristics and the relation between heavy metal contents of agricultural products and the properties of soil were analyzed. The results showed that the contents of Cr, Pb, Cd, As and Hg in farmland were 62.5, 32.6, 0.209, 8.85, 0.080 mg·kg⁻¹, respectively, 0.05%, 0, 14.59%, 0.67% and 1.97% higher than the standards. According to the single factor pollution index assessment, farmland soil was contaminated in the order of Cd>Hg>As>Pb>Cr. From the Nemero comprehensive pollution index, 78.58% of all samples was in the clean state. The whole study area was basically at the level of slight ecological risk with the evaluation method of the comprehensive ecological risk index. The enrichment coefficients of Cr, Pb, Cd and As were higher in the agricultural products on the acid soil, while Hg had stronger enrichment ability on the alkaline soil.

Keywords: farmland soil; agricultural products; heavy metals; pollution assessment

土壤是人类赖以生存和发展的自然环境,是农业生产的重要资源,然而随着社会的不断发展和经济的快速进步,我国农业的迅猛发展也引起了一系列土壤污染问题,农田土壤重金属污染更是引起了

普遍关注。与其他有机化合污染物相比,重金属在土壤中的富集性、持久性和不可逆性更强,所以其存在将会影响农用地的正常生产与使用,更重要的是,这些重金属还可能通过食物链转移到动物和人体

收稿日期:2017-12-28 录用日期:2018-06-19

作者简介:岳蛟(1993—),女,江苏常州人,硕士研究生,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:465862372@qq.com

*通信作者:马友华 E-mail:yhma2020@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41301539)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41301539)

内,危害健康^[1-4]。因此对土壤污染状况进行客观评价尤为重要。

目前,我国对重金属污染评价主要采取单因子指数法、内梅罗综合污染指数法和污染负荷指数法等。此外,陈怀满^[5]建议农田土壤重金属影响评价中要强调土壤-农产品同时采样的重要性,周东美等^[6]和郭观林等^[7]还提出了复合污染的影响。王玉军等^[8]在污染评价中,不仅考虑了土壤环境质量标准、土壤元素背景值,还对农产品污染物限量标准和元素价态效应进行了研究,提出了适用于土壤重金属复合和单独影响的评价方法。刘洪莲等^[9]对江苏省太湖地区某冶炼厂周围的稻田和菜地土壤以及水稻等17种农产品研究发现,农田土壤中重金属Cd、Pb污染严重,同时农产品中这两种重金属含量也超标。本文以安徽省某市农田土壤为研究对象,通过野外调查采集土壤样品1933个,分析了Cr、Pb、Cd、As、Hg等5种重金属元素含量,综合运用描述性统计分析、单因子指数法、内梅罗污染指数法、潜在生态风险指数法和GIS技术阐明重金属污染来源及环境风险,此外还结合部分采样点农产品进行土壤-作物一对一检测分析,旨在探索研究区内农用地土壤重金属和农产品重金属含量特征及其内在联系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省东南部,东临杭州、湖州,南倚黄山,西部毗邻池州、芜湖等城市。地处东南丘陵与长江中下游平原,地势东南高西北低,境内有黄山、天目山、九华山三大山脉。研究区已发现各类矿产55种(含亚种),在全国土壤分布图上属于红壤、黄壤地带^[10]。研究区内分布着不少于5家矿业企业,常年进行露天开采工作,除此之外还有20余家化工、材料等企业,产生大量废气、污水、固体废物等,这些污染物大多分布在河流旁,会对周围河流造成一定的污染,进而通过灌溉影响农用地土壤环境质量。

1.2 样点布置与采样

1.2.1 样点布置

样点布设主要遵循以下要求:样点布设应当在具有乡镇边界(最好同时具有土地利用类型)的地图上进行,布点在全辖区范围内统一安排,不得留有“死角”且每个乡镇至少布设一个采样点。三类重点区域(工矿企业周边农区、大中城市郊区、污水灌区,含修复示范区)和一般农区统一安排,统一布设,在三类重

点区域,布点最小单元为33.33 hm²。

在三类重点区域,每10 m²布1个点,一般农区在余下的点数中安排。布点密度按照蔬菜基地、商品粮基地、大宗农产品生产区、茶叶基地、水果基地及其他农产品产地的次序依次递减,尽量保证点位布设相对均匀。

本研究最终在工矿企业周边农区采集土壤样品620个,在大中城市郊区采集土壤样品137个,在污水灌区采集土壤样品125个,在一般农区采集土壤样品1051个,总计采样点1933个,采样点分布见图1。

1.2.2 样品采集

对采样点进行GPS精确定位,采用梅花形采样法,分样点不少于5个,每点采集1.5 kg左右土样共同组成该采样点混合样,将混合样在塑料布上均匀混合,采用四分法取舍,最后的混合样不少于2.5 kg,装入样品布袋或塑料袋^[11]。农产品样品混合样是在已定采样地块内(20 m×20 m,丘陵、山地可略少)根据不同情况按对角线、棋盘式法、蛇形法、梅花点法等进行多点取样,至少5个分点,然后等量混匀组成一个混合样品。在采样单元内选取采样地块,每点双行,每行0.2 m,全部采集该面积上同一主栽品种的麦穗或稻穗,5点混合成样。水稻采样量一般要求为1000 g(稻穗干质量),稻谷去壳磨碎,过100目筛,蔬菜根据四分法缩分后切碎,按比例加入去离子水,用捣碎机制成匀浆待测。

土壤于2013年10月10日至2015年11月3日在研究区内采集,农产品样品在农作物收获时采集(至

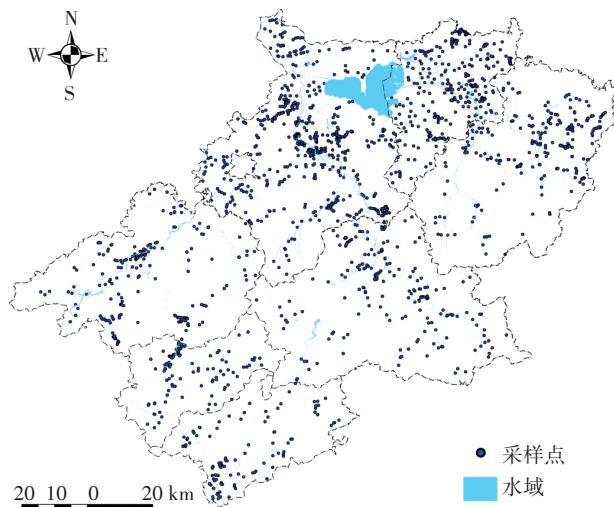


图1 土壤采样点位分布图

Figure 1 Distribution map of soil sampling sites

少采集一季作物,敏感品种优先,有条件的地区可以根据需要采集多季),对应的土壤样品原则上应同步采集。农产品样品采样时间应避开大风或雨中、雨后采样。采样应避开病虫害和其他处于特殊状态下的植株(如刚喷施农药的植株等),尽量用不锈钢制品直接采取样品。

1.3 数据处理

土壤重金属含量的描述性统计分析、相关性分析等运用统计软件SPSS完成,数据统计图由Excel软件完成,地统计分析采用ESRI的ArcGIS 10.0完成。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤重金属污染状况

2.1.1 农田土壤重金属含量

农田土壤5种重金属含量统计结果如表1所示。与安徽省土壤背景值和土壤环境质量二级标准^[12]进行对比,从平均值看来,这5种重金属元素均未超出土壤质量二级标准,但Pb、Cd和Hg 3种元素超出安徽省土壤背景值,说明研究区农田土壤可能已受到不同程度的重金属污染。总体看来,这5种重金属点位超标率排序为Cd>Hg>As>Cr>Pb,按超出背景值百分率排序为Cd>Hg>Pb>Cr>As,两种排序中均为Cd排在第一,说明Cd污染点位较多。

一般来说,变异系数越大代表元素含量差异越大、离散度越高^[13]。5种重金属元素变异系数排序为Hg>As>Cd>Pb>Cr,其中Hg变异系数大于1,说明其空间分布差异大,可能受到人为活动干扰。

根据SPSS 19.0中的k-S检验分析农田土壤pH和5种重金属含量分布规律:pH为正态分布,Cr、Pb、Cd、As、Hg均为近似正态分布。分布频率最多区间为:pH 4.5~6.5、pH 7.0~8.0(占94.67%),说明研究区土壤大多数为弱酸性或弱碱性。重金属含量分布:Cr 25~100 mg·kg⁻¹(占97.93%),Pb 15.6~50.0 mg·kg⁻¹(占94.00%),Cd 0.05~0.50 mg·kg⁻¹(占96.84%),As 2.2~15.9 mg·kg⁻¹(占94.21%),Hg 0.018~0.249 mg·kg⁻¹(占97.52%)。

2.1.2 农田土壤重金属污染空间分布

为了解不同重金属在空间上的分布规律,运用ArcGIS中地统计学模块的克里格插值法对研究区内农用地土壤各重金属元素含量进行插值,制作了重金属含量空间分布图。从图2中可以看出,研究区内Cr、Pb、Cd、As、Hg含量空间分布无明显递增或递减趋势,均存在明显的高值区。

表1 研究区农田土壤重金属含量描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics analysis of heavy metal contents in farmland soil in the study area

指标	Cr	Pb	Cd	As	Hg
最小值/mg·kg ⁻¹	19.8	15.9	0.052	2.15	0.018
最大值/mg·kg ⁻¹	249.0	216.0	1.741	131.10	1.696
平均值/mg·kg ⁻¹	62.5	32.6	0.209	8.85	0.080
标准差/mg·kg ⁻¹	16.9	13.0	0.131	6.90	0.099
变异系数	0.27	0.40	0.62	0.78	1.24
安徽省背景值/mg·kg ⁻¹	66.5	26.6	0.097	9.00	0.033
超出背景值的点位百分率/%	35.80	71.91	93.84	33.73	90.84
土壤质量二级标准/mg·kg ⁻¹	200	250	0.30	30	0.30
点位超标率/%	0.05	0	14.59	0.67	1.97

注:安徽省背景值来自“七五”全国土壤环境背景值调查研究重点科技攻关课题。

Note: Anhui Province background value according to national soil environment background value of key scientific and technological research project during Seventh Five-year Plan.

据调查,研究区高能耗产业在全市工业经济中占较大比重,其中,化学原料及化学制品制造业104户、非金属矿物制品业157户、黑色金属冶炼及压延加工业118户、有色金属冶炼及压延加工业47户,重金属污染主要来源于这些企业。Cr、As、Hg的含量在研究区内普遍较低,其中,Cr在东北部聚集了几个小污染区域,有可能是受到当地涂料厂的影响;As在研究区西部有一个高值区,因为该区域分布着几个矿厂;Hg主要在西部和北部分布着两个污染区域,可能同样是受到矿厂以及蓄电厂的影响。Pb和Cd的含量在研究区都较高,并且都主要分布在研究区南部,Pb主要分布在西南部,而Cd主要分布在东南部,研究区东南部分布众多金属制造工厂,西南部的铅矿场也是这一区域Pb含量较高的主要原因,此外研究区水系发达,污水灌溉和大气沉降情况也较为严重。

2.2 农田土壤重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法^[14-16]是重金属污染评价和其他污染评价方法的基础工作,是对土壤中单个重金属元素污染程度的评价方法。单因子污染指数法主要是运用单一因子对研究区域进行污染评价。公式如下:

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

其中: P_i 表示每个采样点*i*重金属元素的单污染指数; C_i 为每个采样点*i*重金属元素的实测值,mg·kg⁻¹; S_i 为*i*重金属元素的评价标准,mg·kg⁻¹,本研究采用的评价标准是1995年颁布的《土壤环境质量标准》(GB

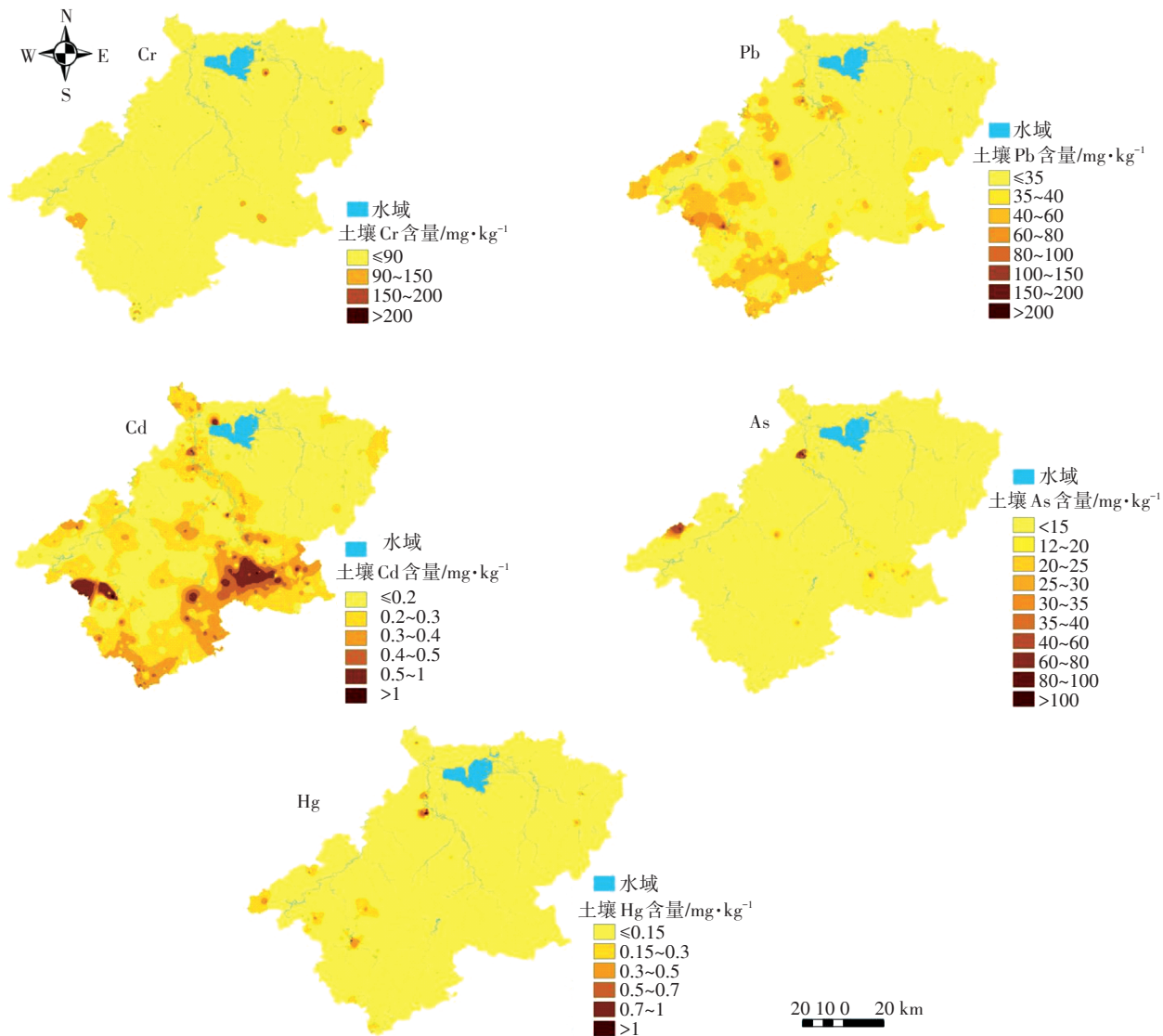


图2 研究区土壤重金属含量空间分布

Figure 2 Spatial distribution of soil heavy metals content in the study area

15618—1995)中的土壤环境质量二级标准^[12]。

根据表2,研究区内农用地土壤 Cr、Pb、Cd、As、Hg 点位总污染率分别为 0.05%、0.62%、11.75%、1.19%、1.91%,污染程度依次为 Cd>Hg>As>Pb>Cr。Cr、Pb、As、Hg 4 种元素的单因子污染指数基本都小

于 1,占总样品数比例均达到 98% 以上,几乎不存在污染情况,仅在小部分地区有一定程度积累。Cd 有 88.25% 的点位单因子污染指数小于 1,有 10.08% 处于轻度污染,是 5 种元素中积累较严重的一种元素。图 3 为研究区农产品产地土壤重金属风险区分布图,与农田土壤重金属污染状况空间分布有相似性,高值点分布一致。

2.2.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法^[17-19]主要是从综合角度考虑研究区内土壤重金属的污染状况,并突出高含量污染元素对环境的影响。公式如下:

$$P_i = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2) \times 0.5} \quad (2)$$

其中: P_i 为 i 采样点的综合污染指数; P_{imax} 为 i 采样点

表2 基于单因子污染指数法重金属污染程度占比

Table 2 Soil contamination based on single factor pollution index

评价指数	污染等级	各污染等级点位占比/%				
		Cr	Pb	Cd	As	Hg
$P \leq 1.0$	未污染	99.95	99.38	88.25	98.81	98.09
$1.0 < P \leq 2.0$	轻污染	0.05	0.57	10.08	0.78	1.29
$2.0 < P \leq 3.0$	中污染	0	0.05	1.20	0.10	0.26
$P > 3.0$	重污染	0	0	0.47	0.31	0.36

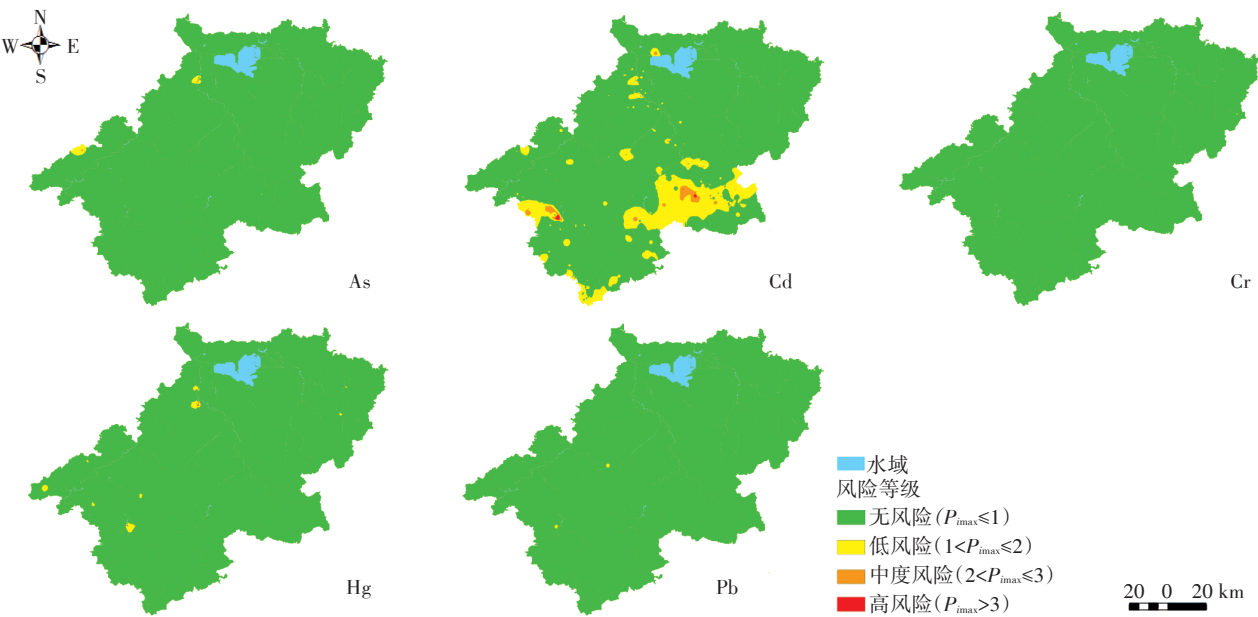


图3 研究区农产品产地土壤重金属风险区分布

Figure 3 Distribution map of heavy metal risk area of agricultural products in the research area

中所有重金属元素单因子污染指数中的最大值; P_{iave} 为*i*采样点所有重金属元素单因子污染指数的平均值,上述计算过程中各参数均无量纲。

内梅罗综合污染指数法存在一个分级标准,是根据农田土壤环境质量监测技术规范(NY/T 395—2000)制定的,具体见表3。

从内梅罗综合污染指数(表4)来看,所有点位中清洁的占78.58%,处于警戒线的占16.64%,受污染的占6.78%,其中轻度污染的占5.59%,中度污染的占0.62%,重度污染的占0.57%。总体看来,研究区污染较轻,只有少数部分存在重金属积累。

图4为研究区农产品产地土壤重金属综合风险区分布图,总体看来研究区污染较少,只有少数部分存在重金属积累,多数为无风险以及低风险区域。在研究区北部以及南部分别分布着几个高值点,与该地区分布着化工厂有关。

表4 基于内梅罗综合污染指数法重金属污染程度占比

Table 4 Soil contamination level based on Nemerow pollution index

评价指数	污染等级	各污染等级点位占比/%
$P \leq 0.7$	安全	78.58
$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	16.64
$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	5.59
$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	0.62
$P > 3.0$	重度污染	0.57

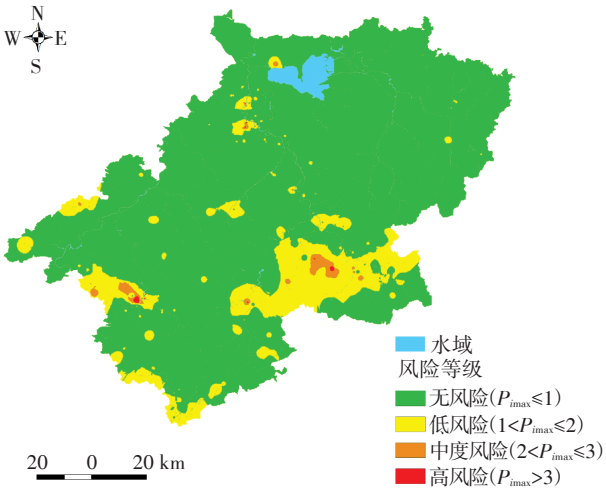


图4 研究区农产品产地土壤重金属综合风险区分布图

Figure 4 Distribution map of heavy metal risk area of agricultural products in the research area

表3 基于内梅罗综合污染指数的土壤分级标准

Table 3 Soil pollution grades based on Nemerow pollution index

等级划分	评价指数	污染等级	污染水平
1	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染物超过背景值,视为轻污染,作物开始受污染
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物均受到中度污染
5	$P > 3.0$	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重

2.2.3 潜在生态风险评价法

潜在生态风险评价法^[20]区别于其他评价方法的优点在于引入了毒性响应系数,即从毒理学的角度考虑了各重金属元素的毒性效应,从而将环境效应同毒理学连接,使评价结果更为全面,具体评价方法如下:

单一重金属污染系数 C_{if} :

$$C_{if}=C_{is}/C_{in} \tag{3}$$

单一重金属潜在生态风险指数 E_{ir} :

$$E_{ir}=T_{ir}\times C_{if} \tag{4}$$

多种重金属综合潜在生态风险指数 RI:

$$RI=\sum_{i=1}^n E_{ir} \tag{5}$$

式中: C_{is} 是重金属*i*的实测含量; C_{in} 为重金属*i*的评价标准值; T_{ir} 为重金属*i*的毒性响应系数,各重金属元素毒性响应系数^[21]见表5。根据潜在生态风险评价法划分的风险等级标准见表6。

根据上述公式及潜在生态风险等级标准,计算出研究区农田土壤中5种重金属的单一潜在生态风险指数(表7)和综合潜在生态风险指数(表8)。从表7中可知,没有重金属元素处于极强生态危害水平,且Cr、Pb均处于轻微生态危害水平。另外,As有0.05%的点位处于中等生态危害水平,Cd和Hg有极少部分的点位处于很强生态危害水平、强生态危害水平和中等生态危害水平。表8反映了研究区5种重金属综合潜在生态风险指数的分级占比情况,从中可以发现,99.28%的点位都处于轻微生态危害水平,仅有0.72%的点位处于中等生态危害,说明研究区内重金属潜在

表5 重金属毒性响应系数

Table 5 Heavy metal toxicity response factor

重金属元素	T_{ir}
Cr	2
Pb	5
Cd	30
As	10
Hg	40

表6 潜在生态风险评价法风险等级标准

Table 6 Indices and grades of potential ecological risk assessment

E_{ir}	RI	风险分级
$E_{ir}<40$	$RI<150$	轻微生态危害
$40\leq E_{ir}<80$	$150\leq RI<300$	中等生态危害
$80\leq E_{ir}<160$	$300\leq RI<600$	强生态危害
$160\leq E_{ir}<320$	$600\leq RI<1200$	很强生态危害
$E_{ir}\geq 320$	$RI\geq 1200$	极强生态危害

生态风险极小。

2.3 农产品重金属污染状况

水稻是我国两大粮食作物之一,研究区位于安徽省东南部^[22-24],处于皖南山区和长江下游平原地带,有4个县(区)为省和国家水稻优势区重点县,2012年水稻种植面积15.73万hm²,占全市粮食作物面积的68.33%,总产量99.63万t,分列全省第五、六位;水稻单产6.33 t·hm⁻²,明显高于其他粮食作物;总产值26.9亿元,占农业产值的30%左右,排第一位。本研究采集了污染农田中38个水稻样品,以及3个青菜样品、1个黄瓜样品、1个萝卜样品,并对应点位土壤情况进行一对一检测。

由表9可知,4种农产品中5种重金属的吸收量平均值大小为Cr:萝卜>青菜>水稻>黄瓜,Pb:青菜>萝卜>水稻>黄瓜,Cd:青菜>萝卜>水稻>黄瓜,As:黄瓜>水稻>萝卜=青菜,Hg:黄瓜>青菜>水稻>萝卜,总

表7 研究区农田土壤重金属单一潜在生态风险指数分级占比

Table 7 Potential ecological risk index of each heavy metals in the study area

评价指数	污染等级	各风险水平点位占比/%				
		Cr	Pb	Cd	As	Hg
$E_{ir}<40$	轻微生态危害	100.00	100.00	94.26	99.95	98.03
$40\leq E_{ir}<80$	中等生态危害	0	0	5.12	0.05	1.24
$80\leq E_{ir}<160$	强生态危害	0	0	0.57	0	0.52
$160\leq E_{ir}<320$	很强生态危害	0	0	0.05	0	0.21
$E_{ir}\geq 320$	极强生态危害	0	0	0	0	0

表8 研究区农田土壤重金属综合潜在生态风险指数分级占比

Table 8 The comprehensive potential ecological risk index of heavy metals in the study area

评价指数	污染等级	各风险水平点位占比/%
$RI<150$	轻微生态危害	99.28
$150\leq RI<300$	中等生态危害	0.72
$300\leq RI<600$	强生态危害	0
$RI\geq 600$	很强生态危害	0

表9 研究区农产品重金属含量(mg·kg⁻¹,平均值)

Table 9 Heavy metals content of agricultural products in the study area(mg·kg⁻¹, mean values)

农产品种类	Cr	Pb	Cd	As	Hg
水稻	1.10	0.13	0.18	0.75	0.027
青菜	3.54	0.61	0.70	0.19	0.062
黄瓜	1.04	0.05	0.11	0.88	0.303
萝卜	9.93	0.44	0.25	0.19	0.004

表 10 研究区农田土壤与农产品一对一检测重金属超标率(%)

Table 10 Over-limit ratio of heavy metals in soil and agricultural products in the study area (%)

监测项	Cr	Pb	Cd	As	Hg
农田土壤	0	2.33	74.82	2.33	37.21
农产品	58.14	23.26	44.19	97.67	55.81

体看来萝卜对重金属的吸收量较多,可能是因为其具有直根肉质茎的缘故。

表 10 为研究区内污染农田上农产品及其对应土壤进行一对一检测结果,农产品产地土壤的超标率为 $Cd>Hg>Pb=As>Cr$,其中 Cr 不存在超标情况;农产品的超标率为 $As>Cr>Hg>Cd>Pb$ 。农田土壤中 Cd 超标率明显高于农产品,可能是受到研究区内石灰厂的影响,除了在石灰性土壤中可出现碳酸盐的沉淀外,随着土壤 pH 的增加,土壤对 Cd 的吸附也会显著增加。而农田土壤中 As 超标率仅 2.33%,而农产品中 As 超标率却达到了 97.67%,可能是由于农产品受到大气沉降或者污水灌溉的影响。

2.4 农产品重金属含量与土壤理化性质关联规律

2.4.1 农产品中重金属与土壤重金属全量、有效态含量和土壤 pH 的关系

研究区农产品中重金属含量与土壤重金属全量、有效态含量和土壤 pH 的相关系数如表 11 所示。农产品中 Cr、Pb、Cd、Hg 4 种重金属含量与土壤中土壤全量均呈正相关,其中农产品中 Hg 含量与土壤 Hg 全量呈显著相关,另外农产品中 As 含量与土壤 As 全量呈负相关,5 种元素相关性排序为 $Hg>As>Cr>Pb>Cd$ 。

研究选取了 Pb 与 Cd 两种重金属土壤有效态含量进行研究,发现土壤中 Pb 有效态含量与农产品中 Pb 含量呈负相关,而土壤 Cd 有效态含量与农产品中 Cd 含量呈正相关,且 Pb 的相关性大于 Cd。

总体看来,土壤 pH 与农产品中重金属含量的相关性大于土壤重金属全量和有效态含量。其中,农产品中 Cr、Pb、Cd、Hg 4 种重金属含量与土壤 pH 均呈正相关,农产品中 As 含量与土壤 pH 负相关,且相关性最小,这 5 种重金属与土壤 pH 的相关性排序为 $Hg>Pb>Cr>Cd>As$ 。

相关性结果表明,农田土壤中重金属全量和有效态含量并不是影响作物中重金属含量高低的决定性因素,但与土壤 pH 有较大关系,并且作物中重金属的累积可能还受其他因素的影响,例如大气沉降以及人为活动等原因。

表 11 农产品中重金属与土壤重金属全量、有效态含量和土壤 pH 的相关性

Table 11 Correlation between heavy metals in agricultural products, available heavy metals contents, total heavy metals contents and soil pH

相关性	土壤全量					土壤有效态		土壤 pH
	Cr	Pb	Cd	As	Hg	Pb	Cd	
Cr	0.059							0.201
Pb		0.013				-0.230		0.241
Cd			0.012				0.084	0.160
As				-0.111				-0.012
Hg					0.371*			0.227

注:*表示在 0.05 水平上显著相关。

Note:* indicates significant correlation at the 0.05 level.

表 12 农产品重金属富集系数与土壤 pH 的相关性

Table 12 Correlation between heavy metals enrichment coefficient of agricultural products and soil pH

相关性	Cr	Pb	Cd	As	Hg
土壤 pH	0.040	0.077	0.035	-0.256	0.123

表 13 不同 pH 条件下农产品重金属富集系数

Table 13 Heavy metals enrichment coefficient of agricultural products under different pH values

土壤 pH	Cr	Pb	Cd	As	Hg
pH<5	2.71	0.14	20.11	16.32	21.77
5≤pH<6.5	3.04	0.37	70.54	10.61	22.65
6.5≤pH<7.5	1.94	0.18	54.37	3.88	20.63
pH>7.5	1.46	0.03	1.29	13.22	85.10

2.4.2 农产品重金属富集系数与土壤 pH 的关系

为进一步探究农产品中重金属含量与土壤 pH 的关系,对农产品重金属富集系数以及土壤 pH 进行了相关性研究。如表 12 所示,农产品中 Cr、Pb、Cd、Hg 4 种重金属富集系数与土壤 pH 均呈正相关,农产品中 As 富集系数与土壤 pH 负相关,但相关性最大,这 5 种重金属与土壤 pH 的相关性排序为 $As>Hg>Pb>Cr>Cd$ 。

农产品在不同土壤 pH 范围的富集系数如表 13 所示,农产品中 Cr、Pb、Cd 富集系数均在土壤 pH 5~6.5 时最大,As 富集系数在土壤 pH<5 时最大,而 Hg 富集系数在土壤 pH>7.5 时最大。总体看来,除了 Hg,其余 4 种重金属元素都是在偏酸性的土壤上富集系数较大。

3 结论

(1)研究区农田土壤 5 种重金属元素污染情况为 $Cd>Hg>As>Pb>Cr$,所有点位中清洁的占 78.58%,研

究区基本处于轻微生态危害水平。

(2)研究区内农产品5种重金属超标率均达到20%以上。农田土壤中Cd超标率明显高于农产品,可能是受到研究区内石灰厂的影响。农田土壤中As超标率仅2.33%,而农产品中As超标率却达到了97.67%,可能是由于农产品受到大气沉降或者污水灌溉的影响。

(3)研究区内农产品重金属含量与土壤pH相关性较高,除了Hg,其余4种重金属元素都是在偏酸性的土壤上富集系数较大。

(4)对研究区空间分布特征进行分析,Cr、Pb、Cd、As、Hg这5种重金属含量主要来源于工矿企业,其次受大气沉降和污水灌溉影响,个别小范围受到外源污染物的影响。

参考文献:

- [1] 王振中, 张友梅, 邓继福, 等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1948-1952.
WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei, DENG Ji-fu, et al. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1948-1952.
- [2] Bushoven J T, Jiang Z C, Ford H J, et al. Stabilization of soil nitrate by reseeding with perennial ryegrass following sudden turf death[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(5): 1657-1661.
- [3] Vulkan R, Mingel G U, Ben A J, et al. Copper and zinc speciation in the solution of a soil-sludge mixture[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(1): 193-203.
- [4] 宋 伟, 陈百明, 刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2): 293-298.
- [5] 陈怀满. 耕地土壤环境质量评价中点对点土壤-农产品同时采样的重要性及必要性[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 封二.
CHEN Huai-man. Importance and necessity of point to point soil agricultural products sampling at same time in soil environmental quality assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): Inside front cover.
- [6] 周东美, 王玉军, 仓 龙, 等. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(10): 1-8.
ZHOU Dong-mei, WANG Yu-jun, CANG Long, et al. Advances in the research of combined pollution in soil and soil-plant systems[J]. *Techni Equipm Environ Pollu Control*, 2004, 5(10): 1-8.
- [7] 郭观林, 周启星. 土壤-植物系统复合污染研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 823-828.
GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Advances of research on combined pollution in soil-plant systems[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(5): 823-828.
- [8] 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 Yu-jun, LIU Cun, ZHOU Dong-mei, 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.
- [9] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006(5): 60-63.
LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk assessment of heavy metals in soil and agro-products in Taihu area[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006(5): 60-63.
- [10] 张俊民, 过兴度, 颜也萍. 皖南宣城丘陵土壤的类型及其特性: 兼论土壤的地带性[J]. 土壤通报, 1984, 15(3): 97-101.
ZHANG Jun-min, GUO Xing-du, YAN Ye-ping. Soil types and characteristics of hilly area in Xuancheng, south Anhui Province: Soil regionalization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984, 15(3): 97-101.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. Third Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准 GB 15618—1995[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
State Bureau of Environmental Protection, State Bureau of Technical Supervision. Environmental quality standard for soils GB 15618—1995[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [13] 陆安祥, 王纪华, 潘瑜春, 等. 小尺度农田土壤中重金属的统计分析与时空分布研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1578-1583.
LU An-xiang, WANG Ji-hua, PAN Yu-chun, et al. Statistical analysis and spatial distribution of heavy metals in small scale farmland soils[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(7): 1578-1583.
- [14] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 599-605.
LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, et al. Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transsect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 599-605.
- [15] 王 飞. 单因子指数与综合指数法在炼油厂作业安全评价中的应用[J]. 绿色科技, 2018(2): 111-112.
WANG Fei. Single factor index and comprehensive index method in safety assessment of refinery operations[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2018(2): 111-112.
- [16] 李方舟, 章 臻, 张昭天, 等. 厦门岛内不同功能区土壤与灰尘重金属污染的特征及评估[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 719-724.
LI Fang-zhou, ZHANG Zhen, ZHANG Zhao-tian, et al. Analysis and evaluation of the soil and dust contamination by heavy metals in different functional zones on Xiamen[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(2): 719-724.
- [17] 潘佳颖, 王建宇, 王 超, 等. 贺兰山东麓葡萄主产区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(6): 173-178.
PAN Jia-ying, WANG Jian-yu, WANG Chao, et al. Distribution char-

- acteristics and pollution assessment for the main grape base soil heavy metals at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6):173-178.
- [18] 王瑜堂, 张 军, 岳 波, 等. 村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1634-1639.
- WANG Yu-tang, ZHANG Jun, YUE Bo, et al. Heavy metal content of the rural solid waste and its land utilization environmental risk analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1634-1639.
- [19] 喻子恒, 黄国培, 张 华, 等. 贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8):2296-2301.
- YU Zi-heng, HUANG Guo-pei, ZHANG Hua, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in paddy soil in Danzhai Au-Hg mining area, Guizhou, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8):2296-2301.
- [20] 赵沁娜, 徐启新, 杨 凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, 3(1):111-116.
- ZHAO Qin-na, XU Qi-xin, YANG Kai. Application of latent ecological hazard index method to soil pollution assessment in a typical pollution industry[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2005, 3(1):111-116.
- [21] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1001.
- [22] 胡 锋, 张春平, 兰陆寿, 等. 宣城市水稻种植结构与高产栽培策略[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(31):11129-11131, 11137.
- HU Feng, ZHANG Chun-ping, LAN Lu-shou, et al. Rice planting structure and cultivation strategy of Xuancheng[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(31):11129-11131, 11137.
- [23] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- Anhui Statistical Bureau. Anhui statistical yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [24] 宣城市统计局, 国家统计局宣城调查队. 2013 宣城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- Xuancheng Bureau of Statistics, Xuancheng Investigation Team, National Bureau of Statistics. Xuancheng statistical yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.