



引用格式:张珂,厉萌萌,刘德权,等.郑州市周边小麦农田土壤中重金属分布特征与污染状况研究[J].轻工学报,2020,35(2):50-58.

中图分类号:X53 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.02.007

文章编号:2096-1553(2020)02-0050-09

郑州市周边小麦农田土壤中 重金属分布特征与污染状况研究

Distribution pattern and pollution status of heavy metals in wheat farmland soil around Zhengzhou city

张珂^{1,2,3}, 厉萌萌¹, 刘德权¹, 张寅栋¹, 史家庆¹, 杨进川¹, 马闯^{1,2,3}
ZHANG Ke^{1,2,3}, LI Mengmeng¹, LIU Dequan¹, ZHANG Yindong¹, SHI Jiaqing¹,
YANG Jinchuan¹, MA Chuang^{1,2,3}

1. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001

2. 中国轻工业污染治理与资源化重点实验室, 河南 郑州 450001

3. 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001

1. School of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Key Laboratory of Pollution Treatment and Resource, China National Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

3. He'nan Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Zhengzhou 450001, China

摘要:测定了2018年6月采集的郑州市周边6个区域21个乡镇小麦农田105个土壤样品中的重金属Pb, Cd, Cu, Zn的含量, 并对其分布特征和污染状况进行了分析。结果表明, 郑州市周边小麦农田土壤中的Pb, Cu和Zn含量的平均值分别为 $12.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $11.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $53.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均低于土壤环境质量标准和河南潮土背景值, 并且随着土壤深度的增加, 这3种重金属含量逐渐减少, Cd含量过低, 未达到仪器检出限。不同区域小麦农田土壤中重金属含量存在明显差异, 其中, 巩义市的小麦农田土壤中Pb, Cu和Zn含量相对较高。小麦农田土壤中, 7个乡镇的Pb含量和5个镇的Zn含量超过河南潮土背景值, 21个乡镇的Cu含量和Cd含量均小于河南潮土背景值; 小麦农田土壤中的Cu与Pb, Zn与Pb可能存在同源性, Cu与Zn可能受多个不同污染源的影响。郑州市周边小麦农田土壤质量整体良好, 但仍需重点监测重金属含量超过河南潮土背景值的农田土壤, 可采取加强土地耕种等农业知识宣传、多用有机肥少用化肥等措施来改善土壤的基本理化性质。

关键词:

小麦农田土壤;
重金属污染;
分布特征

Key words:

wheat farmland soil;
heavy metal pollution;
distribution pattern

收稿日期:2019-09-09

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41801086);郑州轻工业大学2017年度博士科研启动项目(13501050072);郑州轻工业大学2018年第七批校级大学生创新实验项目

作者简介:张珂(1988—),女,河南省泌阳县人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为土壤污染修复及恢复生态学。

Abstract: A total of 105 soil samples was collected from 21 villages/towns wheat farmland in 6 regions around Zhengzhou in June 2018, and the contents of heavy metals Pb, Cd, Cu and Zn in the soil samples were determined. Their distribution pattern and pollution status were analyzed. The results showed that the average values of Pb, Cu and Zn in the wheat farmland soil around Zhengzhou city were $12.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $11.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $53.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, all lower than the soil environment quality standard and He'nan fluvo-aquic soil background value; with the increase of soil depth, the contents of these three kinds of heavy metals gradually decreased, and the content of Cd was not reduced; the contents of heavy metals in the wheat farmland soil in different regions was significantly different; among them, the contents of Pb, Cu and Zn in the wheat farmland soil in Gongyi city were relatively high; in the wheat farmland soil, the Pb content in 7 villages/towns and the Zn content in 5 towns exceeded He'nan fluvo-aquic soil background value; and the Cu content and Cd content in 21 villages/towns were lower than the He'nan fluvo-aquic soil background value; Cu and Pb might have homology, and Cu and Zn might be affected by multiple different pollution sources. The soil quality of wheat farmland around Zhengzhou was generally good, but the farmland soil with heavy metal content exceeding He'nan fluvo-aquic soil background value still needs to be monitored. Measures such as strengthening the publicization of agricultural knowledge such as land cultivation and using organic fertilizers instead of chemical fertilizers can improve the basic physical and chemical properties of the soil nature.

0 引言

农业土壤的质量是影响农业生产、食品安全和人类健康的土壤的重要基质^[1]. 近年来,随着我国经济的快速发展和工业规模的不断扩大,进入土壤系统中的重金属造成的土壤污染越来越严重^[2-3]. 由于土壤中的重金属具有隐蔽性、长期性和不可逆性,容易通过食物链在动植物体内、人体内积累,对食品安全进而对人体健康构成严重威胁^[4-6].

就我国农田土壤而言,重金属污染状况不容乐观. 2014年,环境保护部与国土资源部在《全国土壤污染状况调查公报》中指出,全国土壤总超标率为16.10%,耕地土壤点位超标率为19.40%,其中Pb, Cd, Cu和Zn 4种重金属的点位超标率分别为1.50%, 7.00%, 2.10%和0.90%^[7]. 2015年,我国地质调查局发布的《中国耕地地球化学调查报告(2015年)》中显示,我国已有 $2.3 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 耕地被重金属污染. 环保部门估算,我国每年受重金属污染的粮食高达 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$,造成的直接经济损失超过200亿元. 目前,针对我国农田土壤重金属污染现状

的相关报道^[8-16]已有很多. 李志涛等^[11]对四川省江安县某硫铁矿区周边农田土壤进行研究,发现,研究区土壤中Cd污染超标率高达99.03%, Cu污染超标率为37.20%,整体以中度污染为主. 尹国庆等^[12]对安徽省某典型区农用地土壤中重金属污染状况的研究发现,研究区农用地土壤中Cd, Hg, As, Pb和Cr的超标率分别为26.93%, 3.81%, 23.47%, 3.35%和2.23%. 郑州市作为中原地区的核心城市,常住人口超千万,周边农田是供给市民蔬菜和粮食的重要生产基地,因而对其土壤重金属污染情况进行调查研究,具有重要意义. 王亮等^[13]于2003年对郑州市郊区蔬菜基地土壤中的重金属含量所作的研究发现,重金属Cd和Pb表现出明显的空间分布特征,且污水灌溉是造成郑州市郊区土壤中重金属含量增加的重要原因之一. 余广学等^[14]和高军侠等^[15]分别对郑州市及周边和郑州市东郊G107国道附近的小麦地、蔬菜地的土壤进行检测,结果显示土壤质量总体良好. 但是,郑州市周边土壤多零星分布,随着城市的不断扩张,且受到大气污染物沉降、

固体废弃物堆放、不合理的施肥和灌溉等影响,土壤环境容量下降^[16].因此,有必要进一步研究郑州市周边农田土壤中重金属的污染状况.

基于此,本研究拟以郑州市周边新郑市、新密市、荥阳市、巩义市、中牟县和惠济区6个区域的21个乡镇的小麦农田土壤为研究对象,对土壤中Pb、Cd、Cu和Zn的含量及其空间分布特征进行分析研究,以期为郑州市周边农田土壤管理及农业的可持续发展提供参考.

1 研究区概况

郑州市(34°16'~34°58'N,112°42'~114°14'E)地处黄河中下游的冲积扇平原,海拔110.4 m,地势西高东低,属温带大陆性气候,四季分明,年平均温度13℃,年降水量500~600 mm,降水多集中在7、8月份,无霜期在200 d以上,年平均日照时间2300~2500 h^[17].郑州市及周边属华北平原南部,整体气候较好,昼夜温差较大,夏秋降雨集中,冬春干旱多风,四季气候分明,很适宜农作物种植,更是多种粮食、蔬菜、水果等农作物生长的宝地.潮土和褐土为郑州市的主要土壤类型^[18].

2 研究方法

2.1 样品采集

在调查研究区农田分布的基础上,参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[19]相关规定,于2018年6月,对郑州市周边6个区域(新郑市、新密市、荥阳市、巩义市、中牟县、惠济区)21个乡镇的小麦农田进行土壤样品采集,其中,中牟县位于郑州市东部,荥阳市和巩义市位于西部,新密市位于西南,新郑市位于南部,惠济区位于北部.共设置35个采样点,其分布见图1.每个采样点按梅花布点法进行样品采集,分别采集深度为0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm的农田土壤,混合

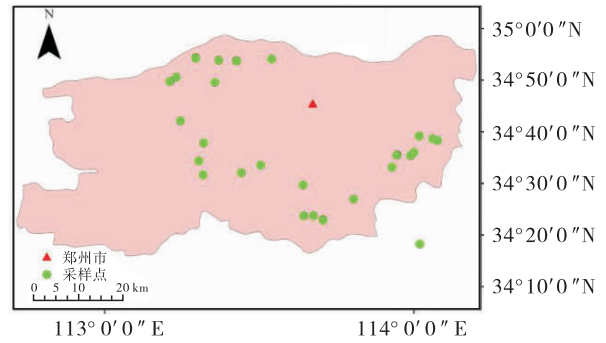


图1 采样点分布图

Fig. 1 The distribution map of sampling sites

均匀后用四分法取约1 kg土壤作为实验所需样品.将土壤样品带回实验室后清除植物根系、砂砾等杂物,经自然风干、压碎、研磨后,过18目筛,然后装入密封袋中,置于阴凉处保存,备用.

2.2 样品测定

采用原子吸收光谱仪(ZEEnit700P,德国)测定土壤样品中Pb、Cd、Cu和Zn的含量.其中,Pb和Cd的含量参照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)^[20]进行测定,Cu和Zn的含量参照《土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法》(GB/T 17138—1997)^[21]进行测定.

2.3 数据分析

利用ArcGis 10.1绘制采样图,使用Excel和Origin 8.5软件对数据进行分析并绘图.

3 结果与分析

3.1 郑州市周边小麦农田土壤中重金属含量分布特征分析

表1为郑州市周边小麦农田土壤(0~20 cm)中重金属含量特征.由表1可知,郑州市周边小麦农田土壤中Pb含量的平均值为12.22 mg·kg⁻¹,Cu含量的平均值为11.20 mg·kg⁻¹,Zn含量的平均值为53.57 mg·kg⁻¹.参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—

2018)^[22]和河南潮土背景值^[23],郑州市周边小麦农田土壤中 Pb, Cu 和 Zn 3 种重金属的含量均明显低于土壤环境质量和河南潮土背景值,说明郑州市周边小麦农田土壤的整体状况良好,这与余广学等^[14]和高军侠等^[15]的研究结果一致.一般认为,变异系数越大表明元素含量差异越大、离散度越高,可能受到人为活动干扰越大^[24].郑州市周边小麦农田土壤中重金属 Pb 的变异系数为 40%,为强变异;Cu 和 Zn 的变异系数均为 30%,为中等变异,这一方面体现了 Pb, Cu, Zn 三者含量的空间差异性,另一方面说明了郑州市周边小麦农田土壤在一定程度上受到了人为活动的影响,其中重金属 Pb 受影响的程度较大.

郑州市周边小麦农田不同土层深度的土壤中重金属含量特征见图 2. 由图 2 可以看出,随着土层深度的增加, Pb, Zn 和 Cu 的平均含量(若无特指,下文中的含量均指平均含量)有逐渐减小的趋势,其中,当土层深度为 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 时, Pb 含量分别为 12.03 mg · kg⁻¹, 12.42 mg · kg⁻¹ 和 11.77 mg · kg⁻¹; Zn 含量分别为 54.82 mg · kg⁻¹, 52.33 mg · kg⁻¹ 和 48.64 mg · kg⁻¹; Cu 含量分别为 11.42 mg · kg⁻¹, 10.99 mg · kg⁻¹ 和 10.41 mg · kg⁻¹. 这可能是表层

表 1 郑州市周边小麦农田土壤
(0 ~ 20 cm) 中重金属含量特征

Table 1 Characteristics of heavy metals contents in the wheat farmland soil (0 ~ 20 cm)

| | around Zhengzhou city | | | mg/kg |
|----------|-----------------------|--------|--------|-------|
| 统计参数 | Pb | Cu | Zn | Cd |
| 最小值 | 2.26 | 4.07 | 31.47 | — |
| 最大值 | 22.06 | 18.22 | 83.87 | — |
| 平均值 | 12.22 | 11.20 | 53.57 | — |
| 标准误 | 0.81 | 0.62 | 2.29 | — |
| 变异系数/% | 39.00 | 33.00 | 0.25 | — |
| 河南潮土背景值 | 14.40 | 21.40 | 65.10 | 0.09 |
| 土壤环境质量标准 | 120.00 | 100.00 | 250.00 | 0.30 |

注:标准误即样本均数的标准差,是描述均数抽样分布的离散程度及衡量均数抽样误差大小的尺度

土壤易受不合理施肥、污水灌溉、大气污染物沉降等因素的影响所致^[15].

本研究未对重金属 Cd 的数据进行比较分析,主要原因是在利用火焰原子吸收法检测土壤中的 Cd 含量时,检测出的数值为负值,初步判断是:郑州市周边农田土壤样品中 Cd 含量过小,未达到仪器检出限.

3.2 郑州市周边不同区域小麦农田土壤中重金属含量特征

图 3 为郑州市周边不同区域小麦农田土壤中重金属含量特征. 由图 3 可以看出,郑州市周边不同区域小麦农田土壤中重金属含量存在明显差异, Pb 含量由高到低为:巩义市 (21.43 mg · kg⁻¹) > 惠济区 (16.81 mg · kg⁻¹) > 荥阳市 (15.58 mg · kg⁻¹) > 新郑市 (12.97 mg · kg⁻¹) > 新密市 (11.34 mg · kg⁻¹) > 中牟县 (7.91 mg · kg⁻¹); Cu 含量由高到低为:巩义市 (15.56 mg · kg⁻¹) > 新郑市 (15.36 mg · kg⁻¹) > 惠济区 (14.42 mg · kg⁻¹) > 新密市 (13.07 mg · kg⁻¹) > 中牟县 (9.53 mg · kg⁻¹) > 荥阳市 (9.40 mg · kg⁻¹); Zn 含量由高到低为:惠济区 (83.88 mg · kg⁻¹) > 巩义市 (77.05 mg · kg⁻¹) > 新密市 (61.29 mg · kg⁻¹) > 荥阳市 (61.05 mg · kg⁻¹) > 中牟县 (44.36 mg · kg⁻¹) > 新郑市 (44.20 mg · kg⁻¹). 不同区域的 Pb, Cu 和 Zn 含量均小于土壤环境质量标准,说明郑州市周边不同区域小麦农田土壤状况良好. 但是,相比于其他区域,巩义市的 Pb, Cu 和 Zn 含量都较高,这可能是由于本研究在巩义市的采样集中在米河镇,该镇丰富的矿产资源和便利的交通,在带动区域经济发展的同时,也造成了“三废”排放的增加,从而导致进入土壤系统的重金属含量的增加.

3.3 郑州市周边不同乡/镇小麦农田土壤中重金属含量特征

表 2 为郑州市周边不同乡/镇小麦农田土

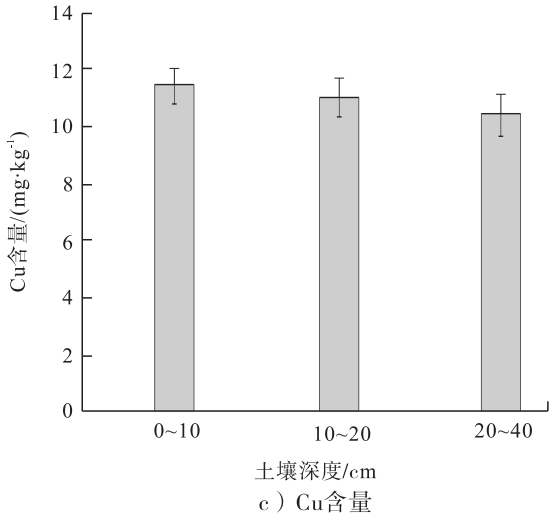
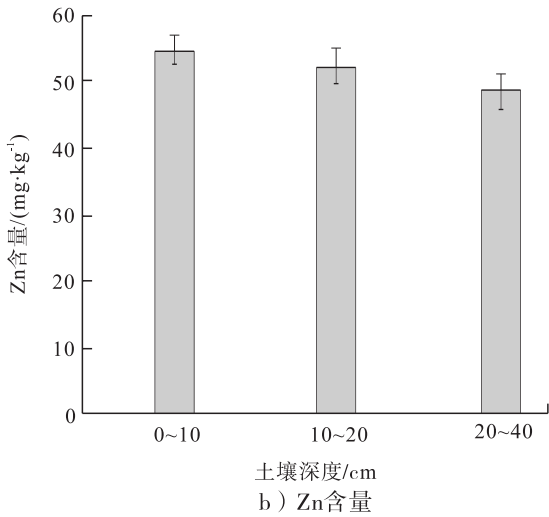
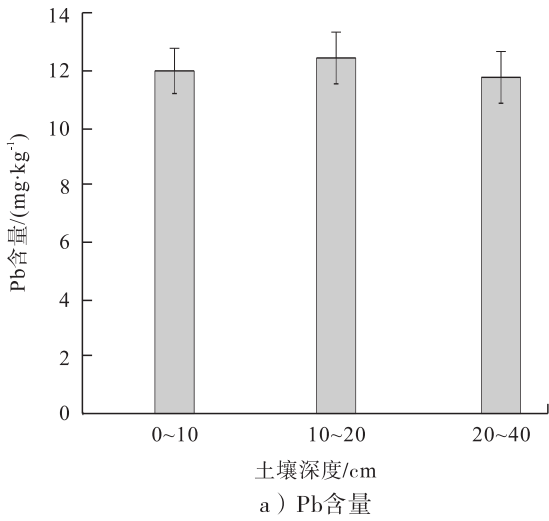


图2 郑州市周边小麦农田不同土层深度的土壤中重金属含量特征

Fig.2 Characteristics of heavy metals contents in different depths of the wheat farmland soil around Zhengzhou city

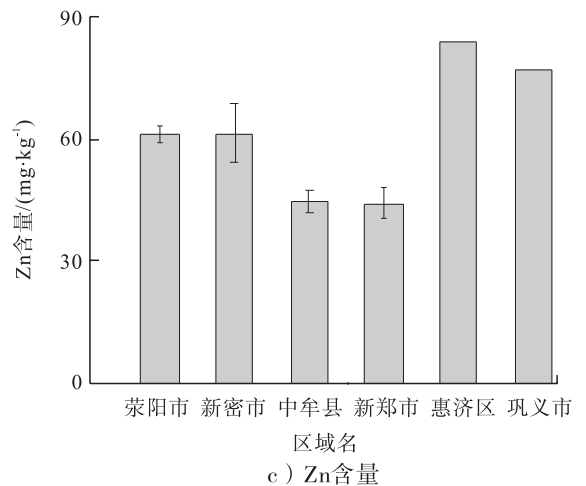
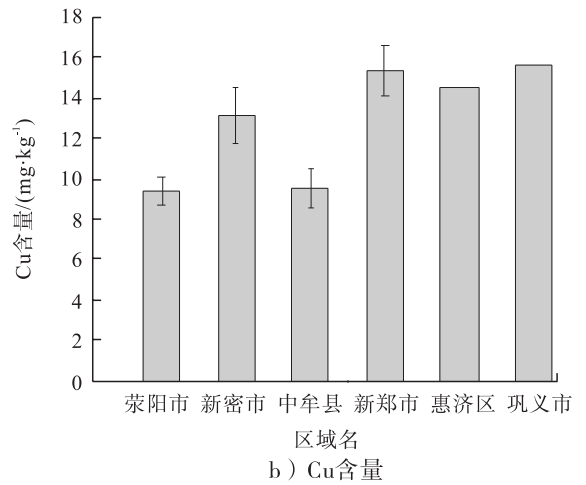
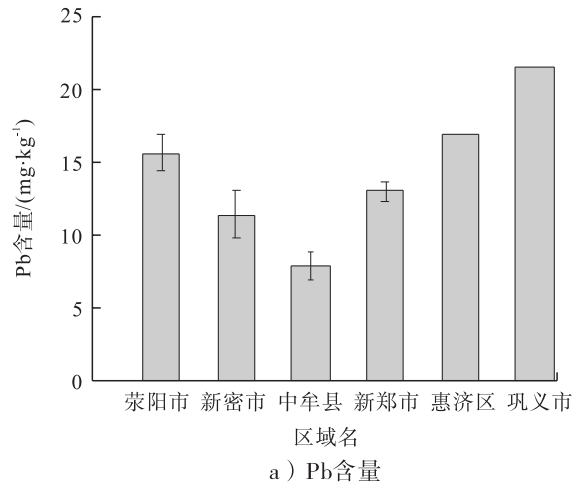


图3 郑州市周边不同区域小麦农田土壤中重金属含量特征

Fig.3 Characteristics of heavy metals contents in the wheat farmland soil of different regions around Zhengzhou city

壤(0~20 cm)中重金属含量特征.由表2可知,郑州市周边不同乡/镇小麦农田土壤中Pb的含量均小于土壤环境质量背景值,但对比不同乡/镇农田土壤中Pb含量发现,金寨回族乡、高山镇、广武镇、古荥镇、米河镇、崔庙镇和曲梁镇7个乡/镇小麦农田土壤中的Pb含量相对于其他14个乡/镇的Pb含量较高,且大于河南潮土背景值,分别超出河南潮土背景值53.47%,16.67%,15.28%,16.67%,48.61%,15.28%和9.03%.其中,金寨回族乡和米河镇小麦农田土壤的超出百分率相对较高,可以推测,这两个乡/镇小麦农田土壤受重金属Pb污染的风险比其他乡/镇更高些.

郑州市周边观音寺镇杨河村、辛店镇、曲梁

镇的小麦农田土壤中Cu含量相对于其他18个乡/镇的Cu含量较高,其中,金寨回族乡的小麦农田土壤中Cu含量最小,为 $6.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但郑州市周边不同乡/镇小麦农田土壤中的Cu含量均小于土壤环境质量和河南潮土背景值.

郑州市周边21个乡/镇小麦农田土壤中的Zn含量均小于土壤环境质量标准,相对于其他16个乡/镇,古荥镇、汜水镇、米河镇、崔庙镇和米村镇5个镇小麦农田土壤中的Zn含量较高,且大于河南潮土背景值,分别超出河南潮土背景值28.88%,0.77%,18.43%,18.13%和22.27%.由于部分采样点小麦农田数量较少,多数以当季蔬菜为主,因此采样点的数量少,无法都做标准误的计算.

表2 郑州市周边不同乡镇小麦农田土壤(0~20 cm)中重金属含量特征

Table 2 Characteristics of heavy metals contents in the wheat farmland soil (0~20 cm) of different villages/towns around Zhengzhou city mg/kg

| 乡/镇 | Pb | Cu | Zn |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| 金寨回族乡 | 22.06 | 6.87 | 59.70 |
| 高山镇 | 16.76 ± 1.76 | 9.16 ± 1.53 | 61.01 ± 3.39 |
| 广武镇 | 16.63 ± 0.45 | 8.49 ± 0.91 | 56.73 ± 0.89 |
| 古荥镇 | 16.81 | 14.43 | 83.88 |
| 王村镇高村乡 | 11.15 ± 0.35 | 9.15 ± 1.12 | 55.98 ± 0.53 |
| 汜水镇 | 10.16 | 11.93 | 65.58 |
| 米河镇 | 21.43 | 15.56 | 77.05 |
| 崔庙镇 | 16.59 | 12.70 | 76.85 |
| 米村镇 | 10.06 | 12.96 | 79.58 |
| 城关镇 | 11.73 | 11.13 | 52.93 |
| 岳村镇 | 9.82 ± 1.60 | 11.19 ± 0.81 | 60.68 ± 2.88 |
| 大孟镇 | 9.82 | 13.32 | 62.18 |
| 姚集镇 | 5.35 ± 1.54 | 7.92 ± 2.33 | 43.04 ± 4.79 |
| 韩寺镇 | 9.07 | 8.66 | 43.43 |
| 黄店镇 | 5.35 ± 0.99 | 7.96 ± 1.82 | 35.75 ± 4.27 |
| 八岗镇 | 9.70 ± 0.46 | 10.41 ± 0.72 | 41.67 ± 0.89 |
| 三官庙乡 | 12.83 | 12.80 | 46.74 |
| 龙王乡赵郭李村 | 9.85 | 10.71 | 31.62 |
| 观音寺镇杨河村 | 13.12 ± 1.09 | 15.53 ± 2.69 | 48.07 ± 9.43 |
| 辛店镇 | 13.91 ± 0.18 | 16.79 ± 0.72 | 45.82 ± 1.71 |
| 曲梁镇 | 15.66 | 16.94 | 44.23 |
| 河南潮土背景值 | 14.40 | 21.40 | 65.10 |
| 土壤环境质量标准 | 120 | 100 | 250 |

3.4 郑州市周边小麦农田土壤中重金属含量相关性分析

有研究表明,土壤中的重金属主要来源于成土母质和人类活动,根据重金属之间的相关性,可以判断土壤中的重金属来源是否相同;若存在正相关,说明其来源可能相同;否则,表明来源可能不同^[25-26].对郑州市周边小麦农田土壤中重金属 Pb,Cu 和 Zn 含量的相关性进行分析,结果见图 4.由图 4 可以看出,小麦农田土壤中 Cu 含量与 Pb 含量的相关系数在 0.05 水平上显著 ($P < 0.05$),Zn 含量与 Pb 含量的相关系数在 0.05 水平上极显著 ($P < 0.001$),而 Cu 含量与 Zn 含量的相关系数在 0.05 水平上不显著 ($P > 0.05$).由此可见,郑州市周边小麦农田土壤中的 Cu 与 Pb,Zn 与 Pb 可能存在同源性,Cu 与 Zn 之间可能受多个污染源的影响,这说明应注意控制农业、工业污染对土壤的影响,以确保农田土壤和作物的安全.

4 结论

本文以郑州市周边新郑市、新密市、荥阳市、巩义市、中牟县和惠济区 6 个区域的 21 个乡镇的小麦农田土壤为研究对象,对郑州市周边不同乡/镇小麦农田土壤中 Pb,Cd,Cu 和 Zn 的含量及其空间分布特征进行分析研究,得到以下结论.

1)郑州市周边小麦农田土壤中重金属 Pb,Cu,Zn 的含量均小于土壤环境质量和河南省潮土背景值,Cd 含量低于检测限,未检测到,土壤整体质量状况良好;3 种重金属含量随土层的加深有明显的减小趋势.

2)郑州市周边不同区域小麦农田土壤中重金属含量存在明显差异:Pb 含量在巩义市最大($22.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),中牟县最小($7.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);Cu 含量在巩义市最大($15.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),荥阳市最小($9.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);Zn 含量

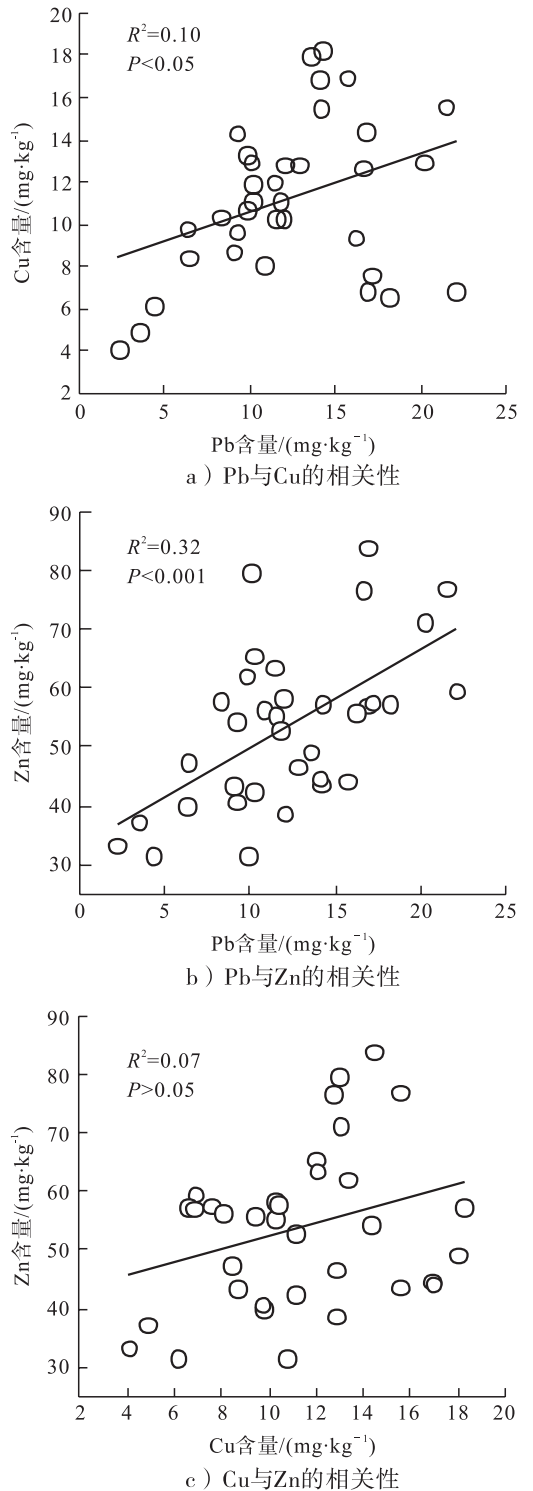


图 4 郑州市周边小麦农田土壤中重金属 Pb 含量、Cu 含量与 Zn 含量的相关性分析图
Fig.4 Correlation analysis diagram of heavy metals Pb content, Cu content and Zn content in the wheat farmland soil around Zhengzhou city

在惠济区最大($83.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),新郑市最小($44.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

3)金寨回族乡、高山镇、广武镇、古荥镇、米河镇、崔庙镇和曲梁镇7个乡/镇的小麦农田土壤中Pb含量超过河南潮土背景值,古荥镇、汜水镇、米河镇、崔庙镇和米村镇5个镇的小麦农田土壤中Zn含量超过河南潮土背景值,21个乡/镇的Cu含量和Cd含量均小于河南潮土背景值.

4)小麦农田土壤中的Cu与Pb,Zn与Pb可能存在同源性,Cu与Zn可能受多个不同污染源的影响.

由以上结果可见,郑州市周边小麦农田土壤质量整体良好,但今后仍应对郑州市周边存在重金属含量超过河南潮土背景值的农田土壤进行重点监测,并在条件允许的情况下,定期对农田土壤中的重金属含量进行测定,以防止土壤中的重金属含量超出土壤环境质量标准.另外,在调查采样过程中发现,部分农田有用污水灌溉的现象,长此以往,不仅会导致输入到农田中的重金属含量增加,而且会影响作物生长和人体健康.因此,需加强土地耕种等农业知识宣传,以减少乃至杜绝重金属进入土壤的途径.此外,多用有机肥少用化肥,可以降低土壤重金属的有效性,阻碍其通过根系吸收进入食物链,同时,可以促进土壤微生物的繁殖,改善土壤的基本理化性质^[27-28].本文研究结果将为保障郑州市周边农田土壤安全和预防潜在风险提供一定理论依据.

参考文献:

[1] HE K L, SUN Z H, HU Y A, et al. Comparison of soil heavy metal pollution caused by e-waste recycling activities and traditional industrial operations[J]. *Environ Sci Pollut R*, 2017, 24(10): 9387.

- [2] LUO C L, LIU C P, WANG Y, et al. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, South China[J]. *J Hazard Mater*, 2011, 186(1): 481.
- [3] ZHUANG P, ZOU B, LI N Y, et al. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan Mine in Guangdong, China: Implication for human health[J]. *Environ Geochem Hlth*, 2009, 31(6): 707.
- [4] PENG J F, SONG Y H, YUAN P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 161(2/3): 633.
- [5] 王烁. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策的探讨[J]. *环境与发展*, 2019, 31(1): 57.
- [6] 张小胖, 罗贤冬. 农用地土壤有效态重金属污染修复技术研究思路及方案建议[J]. *世界有色金属*, 2018(13): 219.
- [7] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 261.
- [8] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1054.
- [9] 周艳, 陈樯, 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): 382.
- [10] 张云霞, 宋波, 杨子杰, 等. 广西某铅锌矿影响区农田土壤重金属污染特征及修复策略[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(2): 239.
- [11] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1272.
- [12] 尹国庆, 江宏, 王强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 96.

- [13] 王亮,符建伟,崔洁,等.郑州市郊区土壤重金属含量分布及成因初探[J].微量元素与健康研究,2010,27(4):34.
- [14] 余广学,张金震,王焯,等.郑州市土壤重金属污染状况和质量评价[J].岩矿测试,2015,34(3):340.
- [15] 高军侠,党宏斌,郑敏,等.郑州市郊农田土壤重金属污染评价[J].中国农学通报,2013,29(21):116.
- [16] 赵勇,李红娟,孙治强.郑州农区土壤重金属污染与蔬菜质量相关性探析[J].中国生态农业学报,2006,14(4):126.
- [17] 王峙.郑州市气候变化对农业生产的影响[J].现代农业科技,2015(20):218.
- [18] 杨磊.郑州市城郊菜地土壤重金属环境风险研究[D].郑州:郑州大学,2009.
- [19] 国家环境保护总局.土壤环境监测技术规范:HJ/T 166—2004[S].北京:中国环境科学出版社,2004.
- [20] 国家环境保护总局.土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法:GB/T 17141—1997[S].北京:中国环境科学出版社,1997.
- [21] 国家环境保护总局.土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法:GB/T 17138—1997[S].北京:中国环境科学出版社,1997.
- [22] 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.
- [23] 徐冠君,张东梅,康淳,等.平顶山矿区周边农田土壤重金属污染特征及评价[J].环境与发展,2018,30(8):22.
- [24] 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.
- [25] 高占启,刘廷凤,刘献锋,等.南京江宁区土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].广州化工,2015,43(22):140.
- [26] 谢龙涛,潘剑君,白浩然,等.基于GIS的农田土壤重金属空间分布及污染评价—以南京市江宁区某乡镇为例[DB/OL].(2019-01-03)[2019-09-01].<http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-TRXB20190102002.htm>.
- [27] 严露,林朝君,王欣,等.有机肥及复配硫酸盐对土壤-水稻系统砷镉有效性的调控[DB/OL].(2020-03-11)[2020-03-13].<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/32.1119.P.20200311.1430.014.html>.
- [28] 赵满兴,刘慧,王静,等.减量复合肥配施生物有机肥对番茄土壤肥力及酶活性的影响[J].农学学报,2020,10(2):56.